



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

“DESARROLLO DE UN EQUIPO DE MONITOREO
INALÁMBRICO DE SENSORES ALIMENTADO MEDIANTE
CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS PARA EL CEEA”

TRABAJO DE TITULACIÓN

Tipo: **DISPOSITIVO TECNOLÓGICO**

Para optar al Grado Académico de:

INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTOR: DENYS FRANCISCO LÓPEZ PILCO

TUTOR: Ing. JOSÉ ENRIQUE GUERRA SALAZAR

Riobamba – Ecuador
2018

©2018, Denys Francisco López Pilco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES INDUSTRIALES

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de investigación: dispositivo tecnológico “DESARROLLO DE UN EQUIPO DE MONITOREO INALÁMBRICO DE SENSORES ALIMENTADO MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS PARA EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y AMBIENTE DE LA ESPOCH“, de responsabilidad del señor DENYS FRANCISCO LÓPEZ PILCO, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Julio Roberto Santillán Castillo VICEDECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	_____	_____
Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	_____
Ing. José Enrique Guerra Salazar DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____
Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____

Yo **DENYS FRANCISCO LÓPEZ PILCO**, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenece a la **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

Denys Francisco López Pilco

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico a mis queridas hermanas Ana Belén, quien conjuntamente con mis sobrinas Romina y Paulita me enseñaron la importancia de luchar en la vida pese a las adversidades y que siempre hay cosas por las que estar agradecido, quien estuvo siempre presente a mi lado incondicionalmente en mis penas y alegrías, triunfos y fracasos, errores y aciertos brindándome su compañía y ocurrencias; y Eugenia Dolores, quien en lo mucho o poco que ha tenido y sin ser su deber, ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de mi vida y a quien le debo el tipo de persona en la que me he convertido hoy en día. A mis padres Dolores Pilco y Francisco López quienes me enseñaron la importancia del trabajo duro, a saber sobrellevar los problemas de la vida, a que nunca es tarde para aprender y superarse a sí mismo para ser cada día una mejor persona.

Denys

AGRADECIMIENTO

Agradezco al Grupo de investigación de Energías Renovables y Ambiente de la ESPOCH y su director Dr. Celso Recalde quien supo ofrecer su apoyo para la realización de es presente trabajo de titulación y el reconocimiento del esfuerzo puesto en el mismo, a mis compañeros, colegas y amigos que supieron brindar su ayuda y conocimiento para llevar a cabo este logro.

Denys

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	7
1.1 Celda de combustible microbiana (MFC)	7
1.1.1 <i>Celda de combustible microbiana para la generación de electricidad</i>	7
1.1.2 <i>Estructura y principio de funcionamiento de una celda de combustible microbiano</i> ..	8
1.1.3 <i>Tipos de celdas de combustible microbianas</i>	10
1.1.3.1 <i>De acuerdo a su número de cámaras</i>	10
1.1.3.2 <i>De acuerdo a su arquitectura</i>	11
1.1.3.3 <i>De acuerdo al tipo de sustrato</i>	12
1.1.4 <i>Celdas de combustible microbianas sedimentarias SMFC</i>	12
1.2 Características eléctricas de celdas de combustible microbianas	13
1.2.1 <i>Voltaje y potencia</i>	13
1.2.2 <i>Densidad de potencia</i>	13
1.2.3 <i>Circuito Equivalente</i>	14
1.2.4 <i>Curvas de polarización</i>	15
1.2.5 <i>Curva de potencia</i>	18
1.3 Sistema de administración de energía (PMS)	19
1.3.1 <i>Necesidades de un PMS</i>	19
1.3.2 <i>Conexión de MFC serie y paralelo</i>	19
1.3.3 <i>Dispositivos comúnmente utilizados en configuraciones de PMS</i>	21
1.3.3.1 <i>Condensador</i>	21
1.3.3.2 <i>Convertidor Charge Pump</i>	21
1.3.3.3 <i>Convertidor DC-DC tipo Boost</i>	21
1.3.4 Configuraciones de PMS	22
1.3.4.1 <i>Configuración capacitor-convertidor</i>	23
1.3.4.2 <i>Configuración charge pump-capacitor-convertidor</i>	24
1.3.4.3 <i>Configuración Capacitor-Transformador-Convertidor</i>	25
1.3.4.4 <i>Otros tipos de sistemas</i>	26
1.4 Red inalámbrica de sensores (WSN)	27
1.4.1 Componentes de una WSN	27
1.4.1.1 <i>Nodo sensor</i>	28
1.4.1.2 <i>Estación base</i>	29

1.4.2	Topologías de WSN	29
1.4.2.1	<i>Topología en estrella</i>	30
1.4.2.2	<i>Topología en árbol</i>	30
1.4.2.3	<i>Topología en malla</i>	30
1.4.3	Estándar IEEE 802.15.4	30
1.4.4	Componentes de una red WPAN con IEEE 802.15.4	31
1.4.5	Topologías permitidas en el estándar IEEE 802.15.4	31
1.4.6	Red tipo estrella IEEE 802.15.4	31
1.4.7	Red tipo punto a punto IEEE 802.15.4	32
1.5	Elementos hardware	32
1.5.1	UDOO	32
1.5.2	Familia de Microcontroladores PIC	33
1.5.3	Sensores	34
1.5.4	Digi XBee 802.15.4	35
1.5.5	Termómetro datalogger HH309	35
1.5.6	NI USB 6009	36
CAPÍTULO II		
2	DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA	37
2.1	Requisitos hardware del sistema	37
2.2	Concepción de la arquitectura general del sistema	37
2.3	Diseño de arquitectura del sistema	39
2.3.1	<i>Diseño del nodo sensor</i>	39
2.3.2	<i>Diseño de la Estación base</i>	39
2.4	Selección de elementos del equipo de monitoreo	40
2.4.1	Elementos de la carga	40
2.4.1.1	<i>Módulo de radiofrecuencia XBee ZB S2C TH</i>	41
2.4.1.2	<i>Sensor ds18b20</i>	43
2.4.1.3	<i>Microcontrolador Pic 16f628a</i>	44
2.4.2	Elementos del Sistema de Administración de Energía (PMS)	45
2.4.2.1	<i>Circuito integrado bq25505</i>	46
2.4.2.2	<i>Circuito integrado TPS61200</i>	47
2.4.2.3	<i>Optomofet LBA716</i>	47
2.4.3	Configuraciones de circuitos del PMS	48
2.4.3.1	<i>Configuración del bq25505</i>	49
2.4.3.2	<i>Configuración del tps61200</i>	52
2.4.4	Elementos en Celdas de Combustible Microbianas	53
2.4.4.1	<i>Construcción de Celdas de Combustible Microbianas Sedimentarias</i>	55

2.4.5	<i>Elementos de la Estación Base</i>	56
2.4.5.1	<i>Mini PC UDOO NEO</i>	57
2.5	Esquemas de conexiones del equipo	58
2.5.1	<i>Diagrama de conexiones de la carga</i>	58
2.5.1.1	<i>Tabla de consumos de la carga</i>	59
2.5.2	<i>Diagrama de conexiones del PMS</i>	60
2.5.3	<i>Diagrama de conexiones de la estación base</i>	62
2.5.4	<i>Conexión de celdas de combustible microbianas sedimentarias</i>	62
2.6	Requerimientos de software del sistema	63
2.6.1	<i>Requerimientos de software del nodo sensor</i>	63
2.6.2	<i>Requerimientos de software para la estación base</i>	63
2.6.3	<i>Concepción general de la arquitectura de software del sistema</i>	64
2.6.4	<i>Software para la configuración del sistema</i>	65
2.6.4.1	<i>Software para la configuración de módulos XBEE</i>	65
2.6.4.2	<i>Software para la programación del microcontrolador pic 16f628A</i>	66
2.6.4.3	<i>Software para la programación de Arduino</i>	66
2.6.4.4	<i>Software para el desarrollo de la aplicación web</i>	66
2.6.4.5	<i>Software para la programación del host de la estación base</i>	67
2.6.4.6	<i>Software utilizado para el envío de datos del nodo sensor</i>	68
2.6.5	Lógicas de programación del equipo	69
2.6.5.1	<i>Diagrama de flujo de la programación del microcontrolador 16f628a</i>	69
2.6.5.2	<i>Diagrama de flujo de la programación de Arduino</i>	70
2.6.5.3	<i>Diagrama UML de la base de datos</i>	72
2.6.5.4	<i>Diagrama de flujo de la programación del Script en Python</i>	72
2.6.5.5	<i>Diagrama de flujo de la programación de la aplicación Web</i>	75
2.7	Fabricación de placas de circuito impreso	77
CAPÍTULO III		
3	MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS	80
3.1	Caracterización de celdas de combustible microbianas	80
3.1.1	<i>Curva de polarización de MFCs con conexión en paralelo</i>	82
3.1.2	<i>Curva de potencia de MFCs con conexión en paralelo</i>	83
3.2	Prueba de Consumo de energía en la carga	84
3.3	Pruebas de comparación de datos	86
3.4	Pruebas de transmisión y recepción de datos	87
3.5	Pruebas de repetitividad del sistema	87
3.6	Pruebas en el nodo sensor	88
3.6.1	<i>Prueba de carga del supercondensador del nodo sensor</i>	89

3.6.2	<i>Prueba de nodo sensor en modo de trabajo</i>	91
3.7	Análisis y discusión	93
3.7.1	<i>Tiempo de carga en arranque en frío</i>	93
3.7.2	<i>Rendimiento del sistema de administración de energía</i>	94
3.7.3	<i>Mejora de la eficiencia en el bq25505</i>	94
3.7.4	<i>Mejora de la eficiencia en el tps61200</i>	95
3.7.5	<i>Rendimiento máximo estimado en el sistema de administración de energía</i>	96
3.7.6	<i>Consumo de energía en la carga</i>	96
	CONCLUSIONES	98
	RECOMENDACIONES	100
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Comparación de sistemas PMS.....	25
Tabla 2-1: Características de familia de microcontroladores PIC.....	33
Tabla 1-2: Características del PIC 16f628a.....	44
Tabla 2-2: Parámetros de funcionamiento del circuito integrado Bq25505.....	53
Tabla 3-2: Valores de funcionamiento mínimos para una eficiencia cercana al 70%.....	55
Tabla 4-2: Valores y conexiones de dispositivos electrónicos del circuito de la carga.....	59
Tabla 5-2: Consumo de potencia de dispositivos que conforman la carga.....	60
Tabla 6-2: Valores dispositivos electrónicos y conexiones del sistema de administración de energía.....	61
Tabla 7-2: Parámetros de configuración de Xbee del nodo sensor y estación base.....	66
Tabla 1-3: Estadísticos de voltajes en circuito abierto individual y paralelo de MFCs.....	82
Tabla 2-3: Valores medidos y calculados para la obtención de las curvas de polarización y potencia de MFCs en paralelo.....	82
Tabla 3-3: Valores de energía y potencia en la carga.....	87
Tabla 4-3: Valores de energía almacenada en el supercondensador y potencia suministrada por los convertidores.....	92
Tabla 5-3: Valores de energía almacenada en cada periodo de transmisión del nodo sensor.....	93
Tabla 6-3: tiempos de carga en arranque en frío y trabajo normal.....	94
Tabla 7-3: Eficiencias y pérdidas en el PMS.....	95
Tabla 8-3: Sistemas de administración de energía reportados en diferentes estudios.....	97
Tabla 9-3: Diferentes tipos de sensores con bajo consumo energético.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema de una celda de combustible microbiana.....	8
Figura 2-1: Materiales utilizados en MFCs.....	9
Figura 3-1: Esquema de una celda de combustible microbiana de cámara simple.....	11
Figura 4-1: Arquitecturas y configuraciones de celdas de combustible microbianas.....	12
Figura 5-1: Celda de combustible microbiana sedimentaria.....	13
Figura 6-1: Circuito equivalente de una MFC. a.- Sin carga b.- con carga.....	14
Figura 7-1: Método de caracterización de una MFC por resistencias.....	15
Figura 8-1: Curva de polarización típica en una MFC.....	16
Figura 9-1: Potenciostato, barrido de potencial lineal.....	17
Figura 10-1: Modelo de un tiempo constante.....	18
Figura 11-1: Curvas de polarización (a) y de potencia (b).....	18
Figura 12-1: Conexión en serie de MFCs.....	19
Figura 13-1: Conexión en paralelo de MFCs.....	20
Figura 14-1: Convertidor dc-dc tipo Boost ideal.....	22
Figura 15-1: Configuraciones de PMS.....	23
Figura 16-1: PMS tipo Capacitor-Convertidor.....	24
Figura 17-1: PMS tipo Charge pump-Capacitor-Convertidor.....	24
Figura 18-1: PMS tipo Capacitor-Transformador-Convertidor.....	25
Figura 19-1: Red de sensores inalámbricos.....	27
Figura 20-1: Estructura básica de nodo sensor.....	28
Figura 21-1: Formación de redes tipo estrella y punto a punto.....	31
Figura 22-1: Mini PCs UDOO.....	33
Figura 23-1: Pic 16f628a empacado 18-pin DIP.....	34
Figura 24-1: Ejemplo de Sensores.....	34
Figura 25-1: Módulo RF XBee 802.15.4 S2C.....	35
Figura 26-1: Termómetro datalogger HH309.....	36
Figura 27-1: NI USB 6009.....	36
Figura 1-2: Tecnologías utilizadas en redes inalámbricas.....	38
Figura 2-2: módulo XBee ZB S2C TH.....	41
Figura 3-2: Sensor de temperatura ds18b20.....	43
Figura 4-2: Conexión básica con alimentación externa ds18b20.....	43
Figura 5-2: Pic 16f628a empacado 18-pin DIP.....	44
Figura 6-2: Bq25505 y placa de evaluación.....	46
Figura 7-2: Tps61200 y placa de evaluación.....	47

Figura 8-2: Optomofet LBA716.....	47
Figura 9-2: Conexión resistencias protección contra sobre voltaje.....	50
Figura 10-2: Conexión resistencias configuración OK_PROG y OK_HYST.....	52
Figura 11-2: Conexión resistencias de configuración de voltaje de salida.....	53
Figura 12-2: Celda de combustible microbiana sedimentar.....	55
Figura 13-2: (UDOO NEO EXTENDED EDITION).....	58
Figura 14-2: Diseño PCB de la carga en EAGLE.....	78
Figura 15-2: Diseño PCB del PMS en EAGLE.....	79
Figura 16-2: Diseño PCB del bq25505 y tps61200 en EAGLE.....	79
Figura 1-3: Circuito para medir la energía en la carga.....	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-2: Diagrama general de funcionamiento del sistema.....	38
Gráfico 2-2: Diagrama de bloques del nodo sensor.....	39
Gráfico 3-2: Diagrama de bloques de la estación base.....	40
Gráfico 4-2: Diagrama de carga	41
Gráfico 5-2: Puntos de transmisión nodos ESPOCH.....	42
Gráfico 6-2: Diagrama de bloque del sistema de administración de energía.....	48
Gráfico 7-2: Eficiencia del bq25505 en función del voltaje de entrada.....	54
Gráfico 8-2: Eficiencia del bq25505 en función de la corriente de entrada.....	55
Gráfico 9-2: Fibra de carbono y malla de acero inoxidable para electrodos.....	56
Gráfico 10-2: Laguna de Colta.....	56
Gráfico 11-2: SMFC construida vista superior y lateral.....	57
Gráfico 12-2: Diagrama de bloques estación base.....	58
Gráfico 13-2: Diagrama electrónico de la carga.....	59
Gráfico 14-2: Diagrama electrónico del PMS.....	61
Gráfico 15-2: Diagrama de conexiones Estación Base.....	62
Gráfico 16-2: Conexión en paralelo SMFCs.....	63
Gráfico 17-2: Diagrama de software del nodo sensor.....	64
Gráfico 18-2: Diagrama de software de la estación base.....	65
Gráfico 19-2: Diagrama de flujo programa microcontrolador PIC.....	70
Gráfico 20-2: Diagrama de flujo Sketch de Arduino.....	72
Gráfico 21-2: Diagrama UML de la base de datos.....	73
Gráfico 22-2: Diagrama de flujo Script Python.....	73
Gráfico 23-2: Diagrama de flujo aplicación web	76
Gráfico 24-2: Diagrama de flujo html.....	77
Gráfico 25-2: Nodo sensor de adquisición de temperatura.....	80
Gráfico 1-3: Voltajes en circuito abierto de MFCs individuales y en conexión paralelo.....	81
Gráfico 2-3: Curvas de potencia y polarización de MFCs con conexión en paralelo.....	83
Gráfico 3-3: Curva de polarización de MFCs con conexión en paralelo.....	83
Gráfico 4-3: Curva de potencia MFCs con conexión en paralelo.....	84
Gráfico 5-3: Voltaje y corriente a través de la carga.....	86
Gráfico 6-3: Potencias instantáneas en la carga.....	86
Gráfico 7-3: Prueba de comparación de datos.....	87
Gráfico 8-3: Página index.html para la presentación de datos.....	88
Gráfico 9-3: Documento de texto plano descargado, de los datos del nodo sensor.....	88

Gráfico 10-3: Diagrama de pruebas del sistema.....	89
Gráfico 11-3: Carga del supercondensador de 0,7 faradios.....	91
Gráfico 12-3: Carga del supercondensador en modo de trabajo.....	92
Gráfico 13-3 Eficiencia del bq25505 para una corriente de entrada de 10mA.....	95
Gráfico 14-3: A.- Voltaje en circuito abierto SMFCs B.- corriente en SMFCs.....	96
Gráfico 15-3: Curvas de rendimiento del tps61200.....	96

ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A** Costos de implementación del sistema.
- Anexo B** Script en Python.
- Anexo C** Página HTML.
- Anexo D** Sketch de Arduino.
- Anexo E** Datos técnicos del Supercondensador.
- Anexo F** Pruebas en protoboard y fabricación de PCBs.
- Anexo G** Recolección de muestras de sedimento y agua y construcción de SMFCs.
- Anexo H** Limpieza de electrodos y preparación de acetato de sodio.
- Anexo I** Hojas Técnicas de los elementos que conforman el sistema.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

AC	Corriente alterna
A/D	Analógico digital
CEM	Membrana de intercambio catiónico
D/A	Digital analógico
Dc	Corriente directa
EIS	Espectroscopia de impedancia electroquímica
Emfc	Diferencial de potencial celda de combustible microbiana
F	Faradio
FFD	Dispositivo de función completa
Ghz	Gigahercios
GND	Tierra
Htмл	Lenguaje de Marcado para Hipertextos
I2C	Inter Integrated Circuit
I	Corriente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JSON	Javascript object notation
KΩ	Kilo ohmio
LAMP	Linux-Apache-MySQL-Php
LCD	Liquid Crystal Display
LR-WPAN	Red de área personal inalámbricas bajas tasa de transferencia de datos
mA	Miliamperio
MAC	Control de acceso al medio
MFCs	Celdas de combustible microbiana
Mhz	Megahercio
mJ	Mili julio
mm	Milímetro
MPP	Máximo punto de potencia
MPPT	Seguimiento del punto de máxima potencia
mS	Milisegundo
mV	Mili voltio
mW	Mili vatio
MΩ	Megohmio
nA	Nano amperio
OCV	Voltaje en circuito abierto
OTCM	One-time constant model

P	Potencia
pF	Picofaradio
PAN	Red de área personal
PAN ID	Identificador de red de área personal
PCB	Tarjetas de circuito impreso
PFM	Modulación por frecuencia de pulsos
PHY	Física
Pint	Potencia interna
PMFC	Celda de combustible microbiana lumínica
PMS	Sistema de administración de energía
PWM	Modulación de ancho de pulsos
RAM	Memoria de acceso aleatorio
Redox	Reacción oxidación reducción
Rext	Resistencia externa
RFD	Dispositivo de función reducida
Rint	Resistencia interna
ROM	Memoria de solo lectura
RS232	Recommended Standard 232
RTC	Reloj de tiempo real
s	Segundo
SMFC	Celda de combustible microbiana sedimentaria
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
SQL	Structured Query Language
TMFC	Celda de combustible microbiana terrestre
uA	Microamperio
uF	Microfaradio
uH	Micro henrio
UML	Lenguaje de Modelamiento Unificado
USART	Receptor transmisor síncrono asíncrono universal
USB	Universal serial bus
V	Voltios
VDC	Voltios de corriente directa
W	Vatio
WMFC	Celda de combustible microbiana agua residual
WPAN	Red de área personal inalámbricas
WSN	Red inalámbrica de sensores
Ω	Ohmio

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación fue la implementación de un equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas para el Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. El dispositivo está conformado de un nodo sensor encargado de tomar datos de temperatura ambientales y enviarlos a una estación base remota, a través de módulos inalámbricos de radiofrecuencia, para almacenarlos en una base de datos. Las celdas de combustible microbianas (MFCs) son los dispositivos encargados de proveer de energía eléctrica al nodo sensor, sin embargo, la cantidad de potencia eléctrica desarrollada por la actividad microbiana es demasiado deficiente razón por la cual, se implementó un sistema electrónico de administración de energía (PMS) que almacena y transforma la energía recibida, a valores de voltaje y corriente requeridos para el correcto funcionamiento del nodo. El PMS implementado alcanzó un rendimiento del 59,58% al ser alimentado mediante MFCs sedimentarias con una potencia de 0,2214 mW, permitiendo al nodo sensor enviar un dato de temperatura con una frecuencia promedio de 20,43 minutos. Se estimó mediante hojas de datos de los dispositivos que conforman el PMS, el máximo rendimiento que este podría alcanzar bajo mejores parámetros de funcionamiento, llegando a un 71,2%. Se concluye que el equipo implementado podría ser utilizado para aplicaciones de monitoreo de variables meteorológicas como una alternativa ecológica y amigable con el medio ambiente. Se recomienda utilizar MFCs que provean una mayor potencia de salida para alcanzar un mejor rendimiento en el sistema.

PALABRAS CLAVE: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA>, <COMUNICACIONES INALÁMBRICAS>, <ENERGÍAS RENOVABLES>, <BIOELECTRICIDAD>, <CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA (MFC)>, <SISTEMA DE ADMINISTRACIÓN DE ENERGÍA (PMS)>, <RED INALÁMBRICA DE SENSORES (WSN)>.

Abstract

The reason for this research was the implementation of a wireless sensor monitor equipment powered by microbial fuel cells for the Alternative Energy and Environmental Research Center of Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. The device is comprised of a sensor node charged to acquire data of ambient temperature and send them to a remote base station. The microbial fuel cells (MFCs) are devices charged of providing energy to the sensor node, although the amount of electrical power developed by the microbial activity is deficient the reason such, it was implemented an administration electronic system of energy (PMS) which stores and transform the received energy, to voltage rating and current required for the performance of the node. The implemented PMS which reached an efficiency of 59,58% when powered by sedimentary MFCs with a power of 0,2214 mV, allowing to the sensor node to send temperature data with an average frequency of 20,43 minutes. It was estimated through data sheets of the devices which comprises the PMS, the optimum performance that this could be achieved under the correct operating parameters, reaching 71,2%. It is concluded that the implemented equipment could be used for monitoring applications of weather variables as an ecological and environmentally friendly alternative. It is recommended to use MFCs that provide more power output to attain a better performance in the system.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, ENGINEERING AND ELECTRONICAL TECHNOLOGY>, <WIRELESS COMMUNICATIONS>, <RENEWABLE ENERGIES>, <BIOELECTRICITY>, <MICROBIAL FUEL CELL (MFC)>, <POWER MANAGEMENT SYSTEM (PMS)>, <WIRELESS SENSOR NETWORK (WSN)>.

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

Las celdas de combustible microbianas(MFC) últimamente han tomado la atención de investigadores como un medio de producción de energía renovable y limpia para aplicaciones de baja potencia, en nuestro caso de estudio para la alimentación de sensores inalámbricos los cuales, como posibles aplicaciones podríamos tener: la monitorización de variables ambientales, agricultura de precisión, adquisición de datos de lugares remotos, entre otros; teniendo como ventaja clave que no dependen de variables no controlables para la producción de energía en contraste con otros tipos de tecnologías renovables tales como la solar que depende de la presencia de luz solar o la eólica que es dependiente de la existencia de viento.

Una celda de combustible microbiana convierte la energía almacenada en los compuestos orgánicos en energía eléctrica a través de reacciones catalíticas de microorganismos, cuyo diferencial de potencial teórico máximo entre dos electrodos es de 0.8 V. En la práctica se obtiene voltajes menores al teórico debido a diferentes factores como: pérdidas óhmicas, tipo de microorganismos, pH, humedad, etc.; con lo cual al tener un voltaje por debajo de 1.1 V, no se podrá alimentar directamente a circuitos integrados como: microcontroladores, módulos de transmisión inalámbricos, sensores; necesarios para un sistema de monitoreo inalámbrico.

Para lograr obtener un voltaje ya sea de 3.3v o de 5 V típico para el funcionamiento de los circuitos anteriormente mencionados, se requiere de la implementación de sistemas de administración de energía (PMS), los cuales a través de circuitos convertidores dc-dc tipo boost, nos permitirán elevar y mantener un voltaje constante a los valores antes mencionados. El PMS también proporcionará el mecanismo para almacenar energía en los lapsos de inactividad del sistema de transmisión para, después utilizarla en los períodos de actividad del mismo.

El Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente de la ESPOCH se encuentra al tanto de este tipo de energías renovables donde, se han obtenido principalmente resultados experimentales enfocados a la composición química y tipos de configuraciones de las celdas de combustible microbianas con lo cual, con este trabajo de titulación se pretende tener una aplicación real y práctica de las mismas así como, proveer un enfoque electrónico del sistema para posibles futuras aplicaciones.

Patricia Abigail Armas Chugcho y Geovany Gustavo Ramírez Yambombo en 2014 realizaron una tesis de grado titulada “GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MICROBIANA CON

DIFERENTES MATRICES ORGÁNICAS MEDIANTE CELDAS DE COMBUSTIBLES” para obtener el título de INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL en la ESCUELA POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO su trabajo se basó en implementó Celdas de Combustible Microbiano (CCMs) para generar energía bioeléctrica observándose que las celdas generaron bioelectricidad durante los 60 días del monitoreo y que Las CCMs que tuvieron una generación más alta de bioelectricidad fueron las con mayor contenido de frutas asociando mayor cantidad de carbohidratos y glucosa.

Washington Nelson Logroño Vintimilla en 2014 realizó su tesis de grado titulada “PRODUCCIÓN DE BIOELECTRICIDAD MICROBIANA UTILIZANDO RESIDUOS ORGÁNICOS COMO SUSTRATO, PARA DOS CASOS DE ESTUDIO: ANDESAMAZONIA, ECUADOR” para obtener el título de INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL en la ESCUELA POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, su trabajo se basó en la comparación de medias indicó que existen diferencias significativas entre la producción de bioelectricidad de acuerdo al tamaño de celda, lugar, y repetición, en ambos casos de estudio, en ANDES sugirió como mejor tratamiento al Intermedio, con 316,5659mV sin embargo en la AMAZONÍA al Pequeño, con 270,0925mV de acuerdo a la escala manejada en este estudio, además mostro la influencia de los parámetros ambientales sobre el rendimiento de bioelectricidad en relación al volumen de MFC en cada ecosistema.

La utilización de celdas de combustible microbianas como generadoras de electricidad para alimentar sistemas de adquisición y transmisión de datos sensoriales, ha sido el campo de mayor interés de estudio en aplicaciones de baja potencia, debido principalmente a las ventajas que ofrecen frente a otras tecnologías renovables como la eólica, solar, térmica, piezoeléctrica, etc, destacando principalmente, el bajo costo de mantenimiento que esta conlleva debido a la inexistencia de partes móviles o de la necesidad de limpieza constante del sistema para su correcto funcionamiento, y de la capacidad de no depender de factores ambientales directos como por ejemplo el viento y luz solar más bien, un consorcio bacteriano tiene la capacidad de generar electricidad las 24 horas del día por un periodo de tiempo indefinido.

La mayor problemática presentada al momento de diseñar y desarrollar este tipo de sistemas sensoriales por diferentes investigadores, ha sido principalmente debido a la dificultad de crear sistemas de administración de energía confiables, escalables, adaptables a los bajos valores potencia y voltaje entregado por las celdas de combustible microbianas, tecnológicamente vigentes además, que en la mayoría de los casos no existe un mecanismo de control en el uso de la energía almacenada en el dispositivo de almacenamiento que por lo general es usada para la

transmisión de datos sensoriales hasta agotarla totalmente, dando como resultado un consumo innecesaria y sin ningún control de la misma.

El presente trabajo de titulación pretende estructurar un diseño electrónico propio para el desarrollo de un equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas, que tome en cuenta los puntos débiles presentados en investigaciones anteriores con el fin de obtener un diseño mejorado y con tecnología vigente, dando como resultado un mejor desempeño, rendimiento y comportamiento del mismo, que permita dar paso a posibles futuras investigaciones e implementación de equipos de monitoreo sensoriales prácticos para el Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente de la Epoch y colectividad en general, impulsando y fomentando así el uso de energías alternativas, renovables y amigables con el medioambiente.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Se podrá implementar un equipo de monitoreo inalámbrico alimentado únicamente con celdas de combustible microbianas?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿El sistema PMS cumplirá con los requisitos adecuados para un funcionamiento continuo y estable?

¿Podrá el dispositivo ser utilizado para una posible red de sensores inalámbricos?

¿Se podrá diseñar el nodo de transmisión de tal manera que tenga un consumo mínimo para que pueda ser abastecido adecuadamente por las celdas microbianas?

JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En el presente proyecto se propone implementar un equipo de monitoreo inalámbrico alimentado únicamente con celdas de combustible microbianas, el cual podría posteriormente ser utilizado para monitoreo en lugares remotos, agricultura, monitoreo de medio ambiente e

incluso expandirse a una red de sensores; comprometidos con la continua investigación e impulsar tecnologías renovables y de poco impacto para el medioambiente.

Para la implementación del dispositivo mencionado, se utilizará como fuente de alimentación celdas de combustible microbianas de tipo terrestre (TMFC's) cuyo funcionamiento está determinada por la acción metabólica de las comunidades microbianas generalmente formando biofilm anódico para oxidar los sistemas biodegradables o sustratos. En general las celdas microbianas son capaces de generar teóricamente un máximo de 1.1 V pero debido a varios factores como ph del suelo, tipo de microorganismo, tipo de sustrato, pérdidas óhmicas entre otros varios factores, el valor real será por debajo del valor mencionados.

La principal característica que determina la potencia que es capaz de entregar cada celda microbiana, está determinada por el valor de su resistencia interna la cual, para obtener una máxima transferencia de potencia deberá ser la más baja posible. Por su puesto dicha resistencia interna depende de varios factores como por ejemplo humedad del suelo, interconexión de elementos como ánodo y cátodo, composición química del suelo, entre otros factores. Dicha resistencia interna puede ser obtenida experimentalmente para posteriormente utilizarla en cálculos de potencia.

Para la parte de adecuación eléctrica, se utilizará sistemas PMS (power manager system) que son sistemas encargados de elevar y mantener el nivel de tensión a valores que podrían ser ya utilizados en circuitos integrados (3.3v a 5v).El sistema PMS también se encarga de almacenar la energía eléctrica y de suministrarla cuando sea necesario, así como también implementa mecanismos de arranque cuando los valores de tensión son demasiados bajos.

Los sistemas PMS poseen varias topologías basadas principalmente en circuitos convertidores dc-dc tipo boost, circuitos charge pumps, transformadores y supercondensadores; los cuales en diferentes configuraciones poseerán diferentes características. La topología seleccionada en nuestro sistema dependerá de parámetros como nivel mínimo de voltaje para el arranque del sistema, periodo de tiempo en cada transmisión y cantidad de datos a ser enviados.

El nodo de transmisión de datos estará compuesto de un microcontrolador que es un circuito integrado programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria así como, de poseer recursos como convertidores A/D, timers, pwms, memorias, distintos tipos de periféricos de comunicación(SPI,I2C,RS232,usb), recursos útiles para logra nuestro objetivo.

Para la transmisión de datos se utilizará un módulo de transmisión-recepción inalámbrico el cual, es el encargado de transmitir datos bajo un cierto protocolo de comunicaciones así como el de optimizar el consumo energético ya sea en modo transmisión, recepción o stand-by.

En el lado de recepción de datos se deberá utilizar un módulo de transmisión-recepción que posea la capacidad de comunicarse bajo el mismo protocolo que el transmisor. También se utilizara para el procesamiento, almacenamiento y presentación de los datos obtenidos, un ordenador de placa reducida de bajo coste y consumo energético.

JUSTIFICACIÓN APLICATIVA

Para conseguir un correcto funcionamiento del dispositivo, las celdas deberán ser capaces de suministrar la potencia requerida por el mismo, para ello y conociendo que una celda de combustible microbiana típicamente posee una densidad de potencia que varía entre $1\text{mW}/\text{m}^2$ a $2000\text{mW}/\text{m}^2$, es muy probable que se requieran de varias celdas microbianas conectadas en paralelo para así obtener una adecuada eficiencia (conectar celdas en serie puede producir una eficiencia muy pobre debido a la suma de resistencias internas de cada celda).

Posteriormente el sistema PMS (Power Manager System) recibirá la energía proveniente de las celdas y el mismo se encargará de almacenar la energía en un supercondensador para después, mediante un circuito dc-dc, obtener a la salida del sistema PMS un nivel de voltaje adecuado para el funcionamiento del nodo de transmisión de datos compuesta por el microcontrolador, el módulo de transmisión-recepción inalámbrico y el sensor. La arquitectura de PMS seleccionada dependerá del voltaje proveniente de las celdas (voltaje mínimo de funcionamiento) y del período de transmisión de datos (consumo energético del nodo).

Una vez obtenido un voltaje adecuado para el funcionamiento del nodo de transmisión, el microcontrolador será el encargado de obtener los datos medidos provenientes del sensor y este a su vez, lo entregará al módulo de transmisión-recepción inalámbrico para su inmediata transmisión. Cabe mencionar que deberemos configurar este sistema para que su consumo energético sea lo mínimo posible para ello, deberemos configurar tanto el microcontrolador como el transmisor trabajen a una frecuencia de reloj lo más bajo posible y por ende una velocidad de transmisión baja. También será clave la adecuada selección del periodo de transmisión de datos y la cantidad de datos enviados en una sola transmisión.

Finalmente, los datos serán recibidos por el módulo de transmisión-recepción inalámbrico y posteriormente enviado al ordenador de bajo consumo donde podremos procesarlos y almacenarlos adecuadamente para su posterior utilización y presentación.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas para el Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente de la ESPOCH.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y establecer los parámetros de funcionamiento del nodo de transmisión para obtener el consumo de potencia del mismo
- Seleccionar y construir el número de celdas microbianas necesarias en base al consumo de potencia obtenido
- Escoger e implementar la topología adecuada del sistema PMS en base al voltaje mínimo entregado por las celdas microbianas y el consumo de potencia del nodo de transmisión de datos
- Diseñar e implementar el sistema de transmisión y recepción de datos sensoriales
- Realizar pruebas con el sistema completo para ver si cumple con los parámetros de funcionamiento establecidos

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se expondrá la parte teórica necesaria para abordar y solucionar el problema expuesto en la formulación del problema. Se iniciará con una revisión de lo que son las celdas de combustibles microbianas tratando en lo posible de evitar expandir el tema hacia áreas que no competen en el estudio pero, tomando muy en cuenta el comportamiento y funcionamiento de las mismas orientadas hacia los fenómenos electrónicos. Luego se expondrá los sistemas electrónicos necesarios para la recolección y adecuación de la energía eléctrica obtenida, para su utilización en casos prácticos del mundo real para finalmente, se realizara una revisión de las redes de sensores inalámbricos que será el caso puntual de aplicación.

1.1 Celda de combustible microbiana (MFC)

1.1.1 Celda de combustible microbiana para la generación de electricidad

Son dispositivos que convierten la energía química, almacenada en compuestos orgánicos e inorgánicos, directamente en energía eléctrica mediante el uso de bacterias como biocatalizadores que degradan los compuestos en una reacción química tipo reducción-oxidación (REDOX). (Potter, 1911; Cohen, 1931; Davis, 1962)

Esta tecnología no es nueva ya que indicios de generación de electricidad por actividad microbiana fue observada hace más de una década atrás (Potter, 1911) sin embargo, gracias al reciente avance tecnológico y al interés por medios de energía limpios y renovables, hoy por hoy la generación de electricidad por actividad microbiana es tomada muy en cuenta como una opción que pueda remplazar paulatinamente a los combustibles no renovables (Logan, 2008, p.10).

Las MFCs como medio de producción de electricidad, han sido tema de estudio de interés en los últimos años debido a que, ofrecen soluciones amigables y sustentables con el medio ambiente para la producción de electricidad y eliminación de materiales tóxicos (Wang et al, 2015, p.3267).

1.1.2 Estructura y principio de funcionamiento de una celda de combustible microbiano

La figura 1-1 muestra una celda de combustible microbiana de cámara doble, constituida principalmente por dos electrodos llamados ánodo y cátodo, una membrana de intercambio catiónico, sustrato y compuestos oxidantes. A continuación se detallaran cada uno de los elementos principales que la conforman.

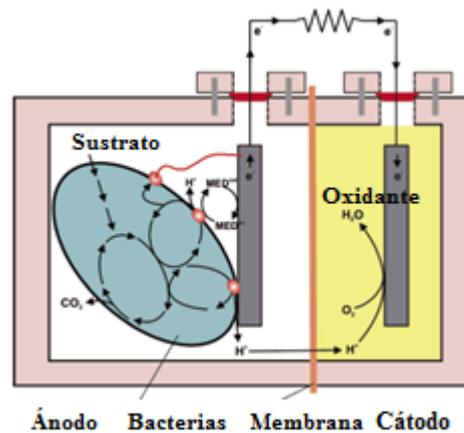


Figura 1-1: Esquema de una celda de combustible microbiana

Fuente: (Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology, 2006, p. 5182)

-Electrodo ánodo.- electrodo ubicado en el interior de una cámara donde se produce la biodegradación de la materia utilizada como combustible por parte de las bacterias, en una reacción tipo oxidación. Este electrodo tiene como propósito recolectar los electrones liberados en el proceso por lo cual, debe ser químicamente inerte y poseer una buena conductividad eléctrica; la cámara debe ofrecer condiciones anaeróbicas para evitar que los electrones liberados reaccionen con el posible oxígeno contenido en la misma.

-Electrodo cátodo.- para que exista una corriente eléctrica, los electrones recolectados por el ánodo deben fluir a través de un circuito cerrado, compuesto por cables conductores y una carga; el electrodo cátodo, ubicado en su propia cámara, es el electrodo encargado de recibir los electrones circulantes mediante la realización de una reacción de tipo reducción. La cámara del ánodo y el cátodo está separada mediante una membrana denominada “membrana de intercambio catiónico (CEM)” (Logan, 2008, p.5)

Las principales características que debe poseer los materiales que conforman tanto el ánodo como el cátodo son: poseer una buena conductividad, ser químicamente compatible y estable, no ser tóxico y no poseer un elevado precio (Logan et al., 2006, 5084). Los principales materiales que cumplen con este tipo de requerimientos son el grafito, el carbón y el acero inoxidable. La figura 2-1 muestra diferentes tipos y formas de materiales utilizados

comúnmente en investigaciones. (A) papel carbón; (B) Placa de grafito; (C) fibra de carbón; (D) malla de carbón; (E) grafito granulado; (F) carbón activo granulado; (G) fieltro de carbón; (H) Carbono vitrificado reticulado; (I) cepillo de carbón; (J) Malla de acero inoxidable.



Figura 2-1: Materiales utilizados en MFCs

Fuente: (Wei et al., 2011, p. 9337)

-Membrana de intercambio catiónico CEM.- esta membrana además de separar la cámara del ánodo y cátodo, cumple con la función de permitir el paso de cationes de hidrogeno creados en proceso de oxidación en la cámara del ánodo, hacia la cámara del cátodo con la finalidad de completar la reacción de reducción, cumpliendo así con la reacción REDOX global. (Logan, 2008, p.6). La CEM además evita el paso de electrones desde la cámara del ánodo hacia la del cátodo y de oxígeno desde la cámara del cátodo hacia la del ánodo. Para la fabricación de las CEMs materiales como Nafion, Hyflon, Zirfon, Ultrex, han sido utilizados (Leong, 2013). Las características que se desean obtener son una alta conductividad, permeabilidad y bajo costo sin embargo, por lo general las CEMs suelen poseer una alta resistencia y un costo elevado (Logan, 2008), esto conlleva a una disminución en la producción de energía y dificulta la escalabilidad.

-Sustrato.- es el medio en donde los microorganismos desempeñan sus funciones vitales y satisface sus necesidades tales como: nutrición, protección, condiciones de temperatura adecuadas, etc. El sustrato se encuentra acumulado en la cámara anódica y puede ser obtenida de diferentes medios tales como: aguas residuales domesticas e industriales, sedimentos marinos, restos alimenticios, lodos de depuración, aguas hervidas, glucosa, etc. El tipo de bacterias presentes en el sustrato depende de su capacidad de vivir en este medio, pudiendo presentarse naturalmente o incluso ser introducidas con el fin de obtener mejores resultados. Entre los tipos de bacterias comúnmente encontradas se puede mencionar: Streptococcus lactis,

Escherichia coli, Proteus mirabilis, Lactobacillus plantarum, etc o incluso encontrar diferentes especímenes conviviendo en el mismo medio.

-Compuesto oxidante.- es un compuesto que acepta electrones a través de un proceso de reducción, facilitando la oxidación de otro compuesto. El compuesto oxidante se encuentra en la cámara del cátodo cuyo objetivo es el de permitir, a través de la reducción de este compuesto, la oxidación del sustrato en la cámara anódica cumpliéndose la reacción redox global. Compuestos comúnmente utilizados en MFC son: ferrocianuro de potasio, que requiere de una cámara catódica para contenerla y oxígeno gaseoso procedente del medio el cual no requiere de una cámara catódica sino, que el cátodo puede ser expuesto directamente al oxígeno circundante del medio.

Si bien el proceso de funcionamiento de una MFC como generadora de electricidad a simple vista pudiera parecer un proceso muy sencillo, en realidad no lo es. El desempeño de una MFC dependerá de una gran cantidad de factores que van desde tipo de bacterias, tipo de sustrato, acidez y pH de sustrato, propiedades conductivas de los materiales, temperatura, configuración de los electrodos, etc sin mencionar que el sistema varía constantemente con el tiempo. Estos factores han sido ampliamente estudiados en numerosos artículos científicos.

1.1.3 Tipos de celdas de combustible microbianas

Se pueden de acuerdo a los siguientes criterios:

1.1.3.1 De acuerdo a su número de cámaras.

-Celdas de combustible microbianas de cámara doble

Son aquellas MFCs que requieren tanto una cámara anódica como una cámara catódica para su funcionamiento. La cámara anódica contiene el sustrato a utilizarse y una cámara catódica indispensable para contener un compuesto oxidante (Figura 1-1). Un ejemplo de la reacción producida en una MFC de cámara doble, utilizando ácido acético como combustible o sustrato (Guo et al., 2012, 163), puede ser entendida mediante la siguiente ecuación REDOX:



De la reacción de oxidación producida en el ánodo, por actividad microbiana, se observa que el ácido acético se ha combinado con dos moléculas de agua dando como resultado dos moléculas de dióxido de carbono, ocho cationes de hidrogeno y ocho electrones libres, mientras que la reacción en el cátodo combinará los ocho cationes provenientes de la cámara del ánodo a través de la CEM, más los ocho electrones provenientes del electrodo cátodo a través de la carga, y más dos moléculas de oxígeno gaseoso dando como resultado cuatro moléculas de agua. Ya en la reacción global se observa como el ácido acético se ha combinado con dos moléculas de oxígeno gaseoso, para dar como resultado dos moléculas de agua y dos de dióxido de carbono.

-Celdas de combustible microbianas de cámara simple.

La figura 3-1 muestra una celda de combustible de cámara simple donde destaca la inexistencia de una cámara catódica debido a que el cátodo es expuesto directamente al oxígeno gaseoso circundante del medio, para realizar la reacción de reducción en el electrodo. El medio puede ser el aire circundante o incluso un medio acuático.

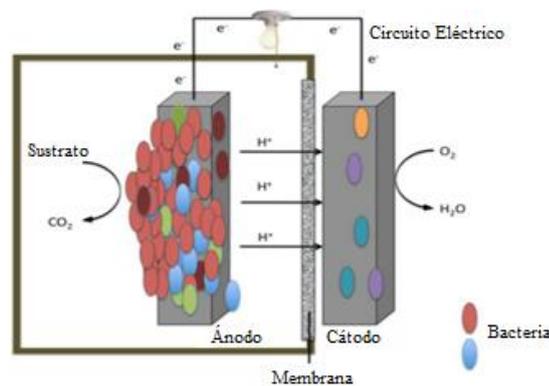


Figura 3-1: Esquema de una celda de combustible microbiana de cámara simple

Fuente: (Ashley E. Franks y Kelly P. Nevin, 2010, p. 904)

1.1.3.2 De acuerdo a su arquitectura.

Estas pueden ser creadas en diferentes configuraciones y formas como las que se muestran en la figura 4-1, tubular (1,2), celda (3), reactor (4) y Stack (5). Estas configuraciones están diseñadas con el fin de soportar las diferentes formas que pueden adoptar los electrodos, hasta incluso la utilización de varios electrodos en una misma MFC, así como el tipo de sustrato utilizado. Además, su arquitectura puede variar de acuerdo al tipo de alimentación que recibirá la MFC pudiendo ser por Batches, donde el sustrato es insertado y mantenido por un tiempo antes de ser remplazado, y por alimentación continua, donde el sustrato fluye continuamente. La

configuración de tipo Stack está compuesta por varias celdas individuales conectadas en configuraciones serie, paralelo o mixtas, todo en un mismo cuerpo.

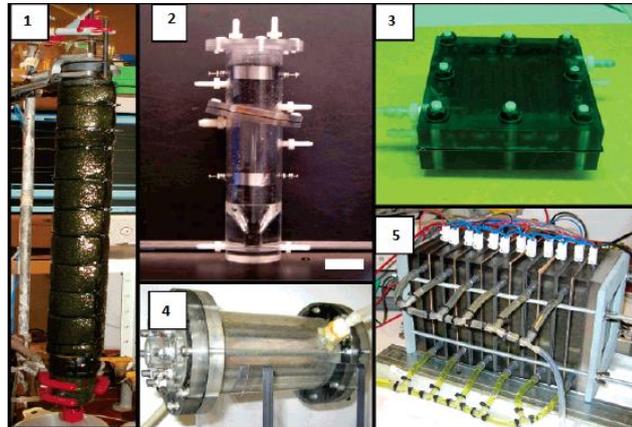


Figura 4-1: Arquitecturas y configuraciones de celdas de combustible microbianas

Fuente: (Logan et al., 2006)

1.1.3.3 De acuerdo al tipo de sustrato

El tipo de sustrato utilizado en celdas de combustible microbianas puede ser muy variado, pudiendo encontrarse entre las principales aquellas que utilizan: tierra (TMFC), sedimentos (SMFC), aguas residuales domesticas e industriales (WMFC), residuos agrícolas, e incluso microorganismos que requieren de luz solar para llevar a cabo el proceso de degradación de la materia orgánica (PMFC).

1.1.4 Celdas de combustible microbianas sedimentarias SMFC.

Este tipo de celda de combustible microbiana, utiliza los sedimentos procedentes de un medio acuático (lagos, ríos, mares) como sustrato, para la producción de energía eléctrica por actividad microbiana presente en el medio naturalmente. La figura 5-1 muestra una SMFC donde el ánodo es enterrado en los sedimentos, que mediante la descomposición del material orgánico por parte de los microorganismos presentes en el mismo, generan una corriente eléctrica para la utilización en algún dispositivo electrónico. Los electrones son recogidos por el cátodo situado por encima del ánodo rodeado por el agua del medio, donde recoge el oxígeno necesario para la reacción de reducción. En este tipo de configuración el agua cumple la función de membrana de intercambio catiónico.

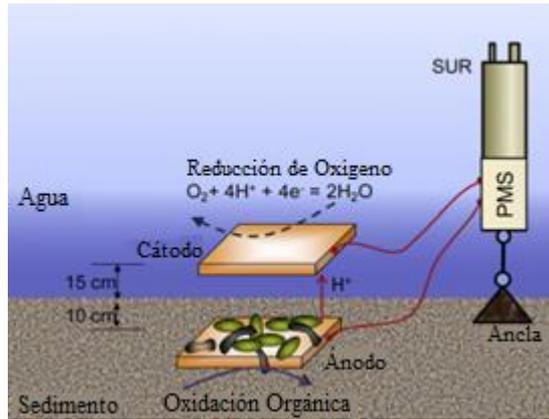


Figura 5-1: Celda de combustible microbiana sedimentaria

Fuente: (Donovan et al., 2013)

1.2 Características eléctricas de celdas de combustible microbianas.

1.2.1 Voltaje y potencia

Teóricamente una celda de combustible microbiana es capaz de entrega como máximo un valor aproximado de 1.1V entre sus electrodos (Logan et al., 2006) sin embargo, en la práctica se han conseguido valores máximos en circuito abierto que oscilan entre 0.7 y 0.8V, debido a pérdidas propias del sistema (Du et al., 2007); y con valores de potencia que oscilan entre 1 y 2000 mW/m^2 (Simon et al., 2002), (Manohar et al., 2009), (Wang et al., 2015).

1.2.2 Densidad de potencia

La potencia entregada por una fuente de voltaje hacia una carga externa viene definida por la fórmula de potencia $P=V \cdot I$ por lo que, en una celda de combustible microbiana se tiene:

$$P = I * E_{MFC}$$

Donde, I es la corriente que circula a través de la carga externa y E_{MFC} el voltaje medido en la misma. Aplicando la ley de Ohm podemos deducir las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{E_{MFC}^2}{R_{ext}} \quad P = I^2 * R_{ext}$$

La potencia puede ser calculada con cualquiera de las tres ecuaciones mencionadas anteriormente, dependiendo de los datos que se tenga a disposición.

Se puede tener distintas configuraciones y arquitecturas de MFCs, cada una con su propia capacidad de generación de potencia por lo cual, se requiere de un mecanismo para poder realizar comparaciones de que tan eficientes son unas respecto a otras, o en otras palabras normalizarlas, esto se logra con la denominada densidad de potencia la cual, es obtenida de la división entre la potencia normalmente calculada y alguna característica de la celda microbiana como por ejemplo: superficie del ánodo, superficie del cátodo, volumen total de la celda microbiana, volumen del sustrato, superficie de la CEM (Logan, 2008, p.p 45-46).

$$P_{normalizada} = \frac{P}{Area\ o\ Volumen} \quad W/m^2 \quad ; \quad W/m^3$$

1.2.3 Circuito Equivalente

Una celda de combustible microbiana al ser generadora de un diferencial de potencial entre sus electrodos, puede ser considerada como una fuente de voltaje y ser representada con el circuito equivalente de una fuente de voltaje real (Figura 6-1a):

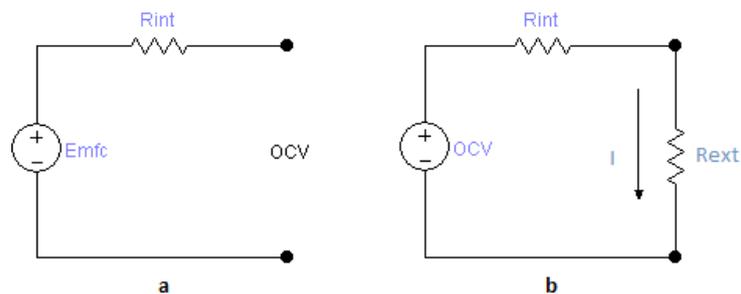


Figura 6-1: Circuito equivalente de una MFC. a.- Sin carga b.- con carga
Realizado por: López, Denys; 2017.

E_{mfc} representa el valor del diferencial de potencial, generado por la MFC, conectado en serie con la resistencia interna R_{int} propia de cada MFC. El valor de E_{mfc} puede ser medido por un voltímetro y será igual al valor de voltaje en circuito abierto OCV esto es, cuando no existe ninguna carga entre sus extremos por lo que no existe ninguna corriente eléctrica fluyendo; la potencia entregada en este caso será cero. Cuando se conecta una carga R_{ext} a la MFC (Figura 6-1.b), se tiene un circuito en serie conformado por el potencial generado por la MFC $E_{mfc} = OCV$, la resistencia interna R_{int} y la resistencia de carga R_{ext} con lo cual, existirá un circuito cerrado con un flujo de corriente I , que atraviesa tanto la resistencia de carga como la interna. Si

calculamos la potencia total entregada por la MFC y las potencias disipadas por cada resistencia con la fórmula de potencia $P = I^2 * R$ se tiene:

$$P_t = P_{int} + P_{ext}$$

$$P_{int} = I^2 * R_{int} ; P_{ext} = I^2 * R_{ext}$$

Lo que se quiere en una celda de combustible microbiana es que esta entregue la mayor cantidad posible de potencia a la carga, evitando pérdidas debido a su resistencia interna, esto se consigue disminuyendo en lo posible el valor de R_{int} que en el caso ideal sería cero sin embargo, en la realidad esto es imposible de lograr debido a que siempre existirán pérdidas del tipo óhmicas, por activación, por metabolismo bacteriano y por concentración (Logan et al., 2006). Como se podrá imaginar disminuir las pérdidas lo máximo posible es una tarea muy complicada y de amplio estudio; esto se logra con métodos que van desde escoger materiales con baja resistividad, tipos de bacteria, tipo de configuración de la MFC, adecuado enriquecimiento y establecimiento de la comunidad microbiana, distancia entre electrodos, temperatura, Ph del sustrato, etc. (Logan, 2008, p.p 52-53)

1.2.4 Curvas de polarización

Es una curva de corriente versus voltaje que describe el comportamiento eléctrico de una celda de combustible microbiana. La forma más sencilla y común de graficar esta curva es mediante la utilización de un conjunto de resistencias, con el fin de obtener diferentes valores de voltaje y corriente.

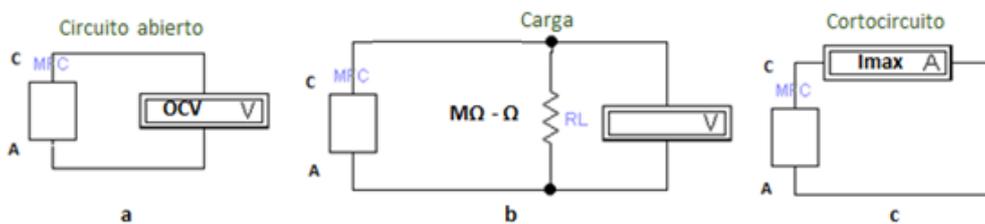


Figura 7-1: Método de caracterización de una MFC por resistencias
 Realizado por: López, Denys; 2017.

Para conseguir la curva de polarización primero se debe medir el voltaje en circuito abierto esto es, sin ninguna carga conectada entre sus extremos (figura 7-1a), cuyas mediciones deben ser iniciadas una vez la MFC haya alcanzado un estado estable. Posteriormente se deben registrar el voltaje medido al añadir una resistencia como carga (figura 7-1b), con valores de resistencias que van desde los mega ohmios hasta los ohmios con los cuales, se puede calcular la corriente

que circula en el circuito mediante ley de Ohm $V = R * I$, así como la potencia disipada en las resistencias mediante $P = V^2/R$ para finalmente, con la ayuda de un amperímetro, medir la corriente en corto circuito (figura 7-1c). Con los valores de voltaje y corriente obtenidos se puede graficar la curva de polarización. La Figura 8-1 representa una curva de polarización típica con valores de corriente normalizados por el área total de uno de sus electrodos.

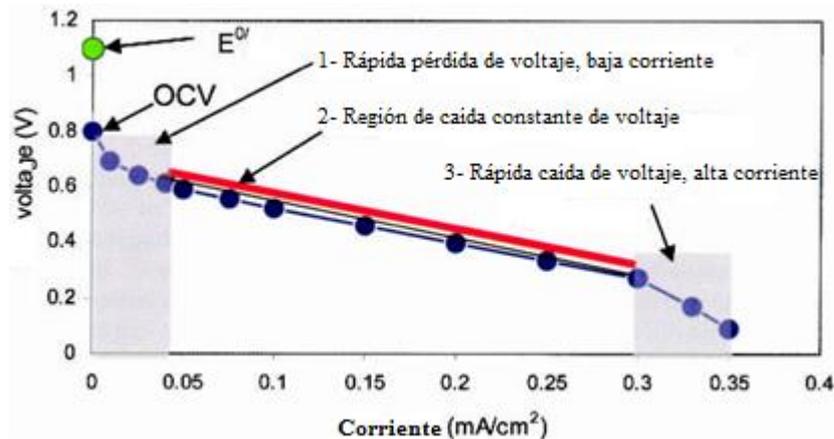


Figura 8-1: Curva de polarización típica en una MFC

Fuente: (Logan, 2008, p. 52)

De la curva de polarización se destacan tres regiones (Logan, 2008, p.p 52-53):

1- En la región se observa una rápida caída de voltaje a bajas corrientes debido a las pérdidas por activación. Su efecto disminuye notablemente al aumentar la corriente.

2- Región donde se observa una caída de voltaje constante debido a que las pérdidas mayoritariamente son debidas al carácter puramente resistivo de los materiales (pérdidas óhmicas).

3- Al igual que en la región 1, en esta región se observa una rápida caída de voltaje pero en altas corrientes. Este comportamiento es debido a las pérdidas por concentración.

En general la curva característica de una MFC se aproxima mucho a una línea recta debido a su naturaleza mayoritariamente resistiva, cuya pendiente vendrá a representar la resistencia interna R_{int} de la MFC.

Si al circuito equivalente de la figura 7-1 se aplica la ley de voltaje de Kirchhoff y Ohm, se obtiene una ecuación del voltaje medido en la MFC, E_{MFC} en función de la corriente I que atraviesa el circuito. Asumiendo que R_{int} es puramente resistiva, la ecuación representa una

línea recta que corta en OCV en la ordenada y cuya pendiente es R_{int} ; este modelo podrá ser utilizado únicamente cuando la curva de polarización se aproxime a una línea recta.

$$V_{Rext} = E_{MFC} = OCV - I * R_{int}$$

La curva de polarización también puede ser obtenida a través de técnicas electroquímicas (Nealson y Mansfeld, 2008) como por ejemplo las de barrido de voltaje donde un voltaje variable es inyectado al sistema a una determinada velocidad, con el fin de registrar la respuesta de corriente. El dispositivo que permite realizar este tipo de técnicas es el potencióstato (figura 9-1)

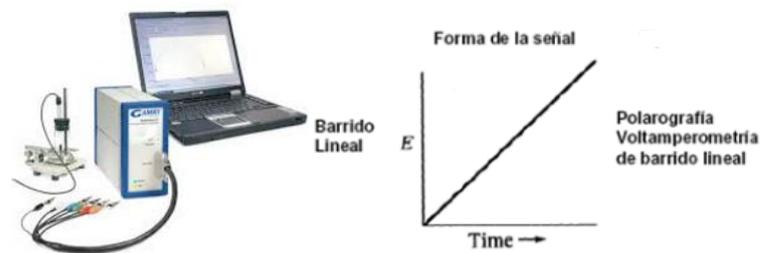


Figura 9-1: Potencióstato, barrido de potencial lineal
Fuente: (Logan, 2008, p. 52)

La técnica utilizada para determinar la curva de polarización es la técnica voltamperometría de barrido lineal, donde una forma de onda de tipo lineal creciente es inyectada a la MFC con valores que van desde el voltaje en circuito abierto hasta los cero voltios, con una velocidad de 0.1mV/s (Manohar et al., 2008); los valores de voltaje-corriente son registrado para después ser graficados por el software del dispositivo. La curva de polarización obtenida por el potencióstato es mucho más detallada y precisa que la obtenida utilizando juegos de resistencias.

Algunos potencióstatos permiten realizar una técnica denominada espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Esta técnica permite determinar la impedancia de la MFC mediante la aplicación de una señal de voltaje de tipo sinusoidal de muy baja amplitud, con frecuencias que van desde los hercios hasta los megahercios; las respuestas de corriente son registradas y utilizadas por el software del dispositivo, para determinar las impedancias e incluso un modelo de la MFC, donde el más utilizado es el modelo one-time constant model (OTCM) (figura 10-1)

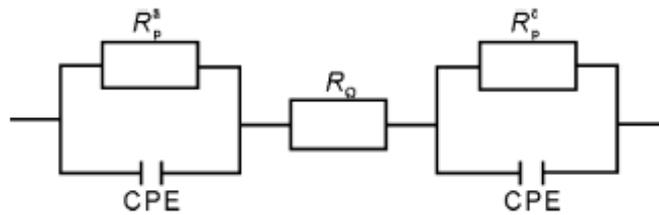


Figura 10-1: Modelo de un tiempo constante
Fuente: (Huan et al., 2008)

El modelo representa la resistencia óhmica de la MFC R_{Ω} , conectada en serie con las resistencias de polarización del ánodo R_p^a y cátodo R_p^c que a su vez, se encuentran conectadas con una capacitancia CPE debida a cada electrodo (Manohar et al., 2008). Este modelo es mucho más detallado que el que considera simplemente las pérdidas óhmicas y puede ser aplicado cuando las curvas de polarización no se comportan como una línea recta (figura 11-1.a línea sólida).

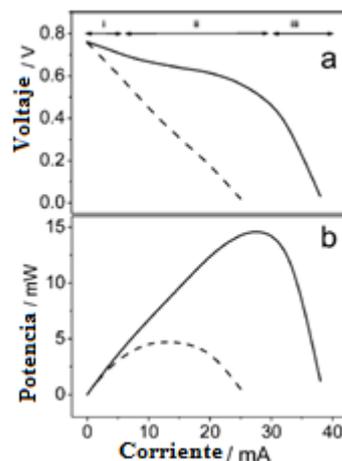


Figura 11-1: Curvas de polarización (a) y de potencia (b)
Fuente: (Huan et al., 2008)

1.2.5 Curva de potencia

Es la curva que permite ver cómo se comporta la potencia entregada por la MFC la cual, es calculada mediante la multiplicación de los valores de voltaje-corriente de la curva de polarización, y graficados en función de la corriente o densidad de corriente (figura 11-1b). Esta curva por lo general tiene forma de campana cuya máximo punto de potencia (MPP), es el punto donde se reporta el máximo valor de potencia que la MFC entrega hacia la carga.

1.3 Sistema de administración de energía (PMS)

1.3.1 Necesidades de un PMS

Las celdas de combustible microbiana han sido ampliamente estudiadas como medio para la generación de energía eléctrica sin embargo, el voltaje y la potencia entregada por las mismas es muy limitado como para alimentar directamente dispositivos electrónicos de uso general. Por ejemplo una MFC puede proveer valores de voltaje comprendidos entre 0.3 y 0.9 V y una potencia de salida que ronda los 10mW (Zhang et al., 2012) pero, el voltaje requerido para alimentar circuitos integrados con lógica digital tales como microcontroladores, radiofrecuencia, sensores, etc por lo general requieren valores de voltaje de 3.3V o 5V.

Un sistema de administración de energía o PMS es un sistema electrónico, cuyo principal objetivo es de adecuar el voltaje o potencia proveniente de celdas de combustible, paneles solares, generadores termoeléctricos y piezoeléctricos; con la finalidad de obtener una forma de energía adecuada para la utilización en aplicaciones de mundo real (Zhang, 2012). Para conseguir este objetivo, un PMS puede estar compuesto por dispositivos electrónicos tales como capacitores, convertidores tipo charge pumps, convertidores tipo boost, diodos, inductores, transformadores, interruptores de potencia y potenciómetros (Dewan et al., 2014).

1.3.2 Conexión de MFC serie y paralelo

Una MFC puede ser considerada como una fuente de voltaje y como tales pueden ser conectadas en configuraciones tipo serie, paralelo o mixtas. Una configuración en serie puede ser observada en la figura 12-1 donde cada fuente se conecta seguida de otra; en teoría el voltaje resultante es igual a la suma total de los voltajes aportada por cada fuente individual y cuya resistencia interna total es igual a la suma de las resistencias internas individuales.

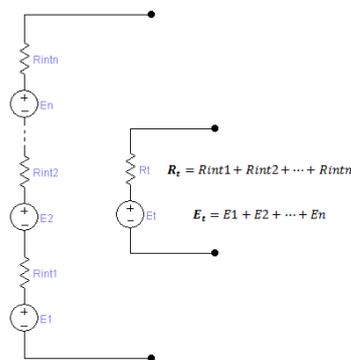


Figura 12-1: Conexión en serie de MFCs
Realizado por: López, Denys; 2017.

Aplicada a celdas de combustible microbianas, se puede pensar en utilizar esta configuración para elevar el limitado voltaje entregado por cada MFC sin embargo, las pérdidas no necesariamente son de tipo resistivas sino, por factores como perdidas por activación, por metabolismo bacteria y por concentración por lo que el voltaje resultante será un tanto menor al que predice la teoría además, hay que considerar que las pérdidas por resistencia interna aumentarían debido a la resistencia interna aportada por cada MFC. A pesar de los inconvenientes mencionados anteriormente, se podría seguir pensando en utilizar este método para elevar el voltaje como por ejemplo Ieropoulos et al. (2002), utilizó esta configuración para alimentar robots móviles denominados Ecobot I y II pero, cabe destacar que esta configuración puede presentar repentinas inversiones de voltajes debido a cambios internos propios de cada MFC, dando como resultado un voltaje mucho menor al esperado (Wang et al., 2015); por la baja eficiencia y al riesgo de repentinas inversiones de voltajes, la configuración de MFCs en serie no es recomendada como método para elevar el voltaje.

En la conexión de fuentes de voltaje en paralelo (Figura 13-1), asumiendo que el voltaje entregado por cada fuente es igual, el voltaje resultante es igual al voltaje registrado en las mismas y cuya resistencia interna total es igual al inverso de la suma de los inversos de cada resistencia interna.

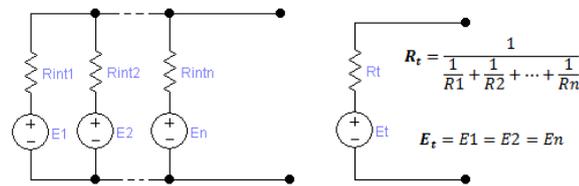


Figura 13-1: Conexión en paralelo de MFCs
Realizado por: López, Denys; 2017.

Aplicado a MFCs esta configuración tiene como desventaja que el voltaje resultante no supera el voltaje de la celda con mayor potencial sin embargo, la resistencia interna resultante disminuirá conforme aumente el número total de MFCs que intervienen en la configuración, esto se refleja en un aumento en la potencia total entregada por el sistema debido a la disminución en las pérdidas por resistencia interna. La configuración de MFCs en paralelo es también conocida como configuración en Stack la cual es recomendada para incrementar la potencia entregada por las mismas. Por ejemplo Ieropoulos et al. (2008) demostró que se obtiene un mejor rendimiento conectando pequeñas celdas en paralelo en comparación a una sola de gran tamaño con el mismo volumen de sustrato.

1.3.3 Dispositivos comúnmente utilizados en configuraciones de PMS

1.3.3.1 Condensador

Es un dispositivo que almacena energía eléctrica en forma de campo eléctrico entre dos placas conductoras, separadas por un material dieléctrico. Entre los diferentes tipos de condensadores existentes, podemos encontrar los denominados supercondensadores y ultracondensadores los cuales, poseen una alta capacidad en contraste con los condensadores convencionales; tienen como ventaja la rapidez de carga y tolerar un mayor número de ciclos de carga y descarga en comparación a baterías recargables convencionales.

1.3.3.2 Convertidor Charge Pump

Es un circuito electrónico cuyo objetivo es el de elevar el voltaje aplicado en su entrada una N cantidad de veces (Palumbo y Pappalardo, 2010). La principal característica de este tipo de convertidor es que utiliza como elemento principal un capacitor o capacitores, a diferencia de los convertidores tradicionales que suelen utilizar bobinas. El Charge Pump logra elevar el nivel de voltaje mediante la ayuda de circuitos conmutadores que conectan en serie condensadores previamente cargados.

1.3.3.3 Convertidor DC-DC tipo Boost

Es un circuito electrónico cuya salida de voltaje es igual o mayor que su voltaje de entrada. La figura 14-1a muestra el circuito de un convertidor tipo boost básico compuesto por la bobina L , un diodo de paso $D1$, un condensador de carga y un pulsador; con una entrada de voltaje V_s y a su salida conectada una carga con un voltaje de salida V_o . En el tiempo t_1 el pulsador se cierra con lo cual el voltaje en la bobina V_L será igual al voltaje V_s , con lo cual empezará a almacenar energía con una corriente creciente a una velocidad $\Delta i/t_1$. $D1$ se abre en este periodo de tiempo (Rashid, 1995, p.309). En ecuación esto es:

$$V_s = V_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{\Delta i}{t_1} \quad \Rightarrow \quad \Delta i = \frac{V_s t_1}{L}$$

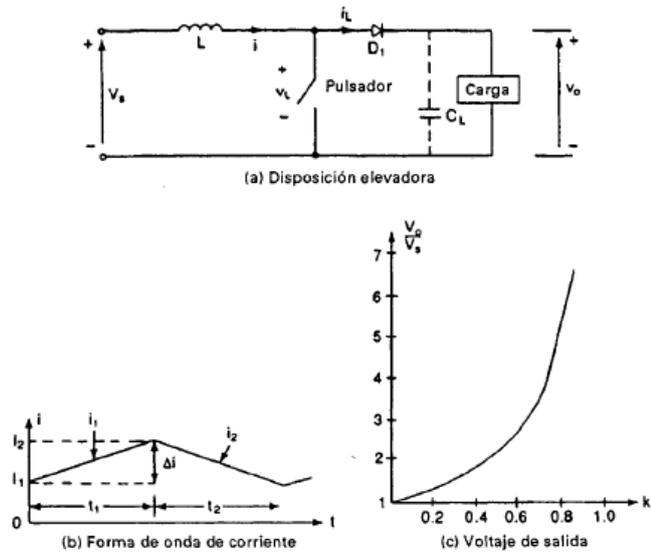


Figura 14-1: Convertidor dc-dc tipo Boost ideal
Fuente: (Rashid, 1995, p.310).

Si consideramos un estado de conducción continua (figura 14-1b) y el interruptor se abre, la energía almacenada en L se libera y empieza a fluir hacia la carga con una forma de corriente decreciente. Por ley de voltajes de Kirchoff el voltaje instantáneo V_o será:

$$V_o = V_s + L \frac{\Delta i}{t_2} = V_s + \frac{L V_s t_1}{t_2 L} = V_s \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right) = V_s \left(\frac{1}{1 - k} \right)$$

El valor de k es el ciclo de trabajo del convertidor a una frecuencia determinada el cual, puede tomar valores entre 0 y 1. Si k es igual a cero, la salida V_o es igual a V_s que es el mínimo valor entregado por el convertidor, pero a medida que k aumenta su valor, la salida V_o crece de acuerdo a la figura 14-1c hasta llegar al infinito cuando K es igual a 1 (Rashid, 1995, p.310). El condensador C_L permite obtener una salida casi continua acorde a su valor.

1.3.4 Configuraciones de PMS

Existen tres principales configuraciones comúnmente utilizadas en el diseño de PMS para alimentar dispositivos de baja potencia en modo intermitente (Figura 15-1), cada una con sus ventajas y desventajas que serán discutidas a continuación. (a) Capacitor-Convertidor (b) Charge pump-Capacitor-Convertidor (c) Capacitor-Transformador-Convertidor.

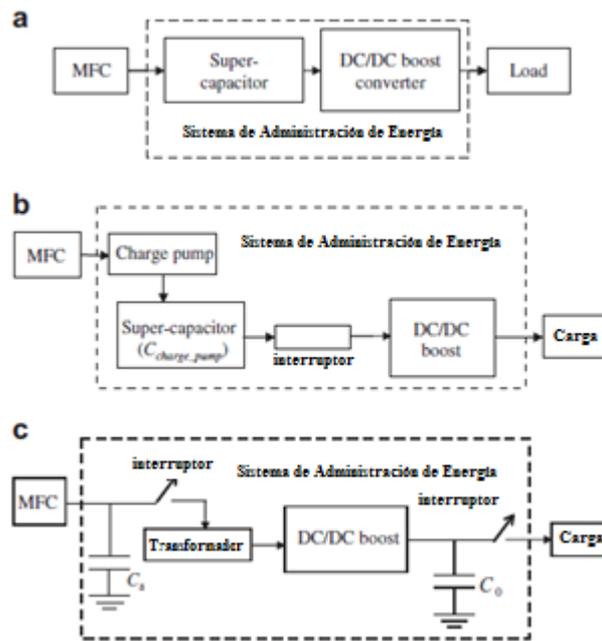


Figura 15-1: Configuraciones de PMS
Fuente: (Zhang et al., 2012)

1.3.4.1 Configuración capacitor-convertidor

Este tipo de configuración (Figura 16-1) utiliza como dispositivo de almacenamiento de energía, un supercondensador conectado directamente a las MFCs, por tanto el voltaje máximo de carga alcanzado será el existente en circuito abierto OCV de las mismas; la energía almacenada y el tiempo de carga en el supercondensador dependen de su capacidad. Seguido del supercondensador se conecta un convertidor tipo dc/dc elevador con el fin de elevar el nivel de voltaje una vez el condensador haya completado su carga.

El supercondensador es requerido en el sistema debido a que por lo general un convertidor DC-DC tipo boost, requiere de un nivel de corriente relativamente elevada en el momento de su arranque en frío y tomando en cuenta que una MFC produce una corriente en el orden de los micro o en el mejor de los casos miliamperios, un convertidor de este tipo no será capaz de entrar en funcionamiento conectándolo directamente. La principal ventaja de esta arquitectura es la simplicidad en su configuración sin embargo, tiene la desventaja de que al ser el voltaje final en el supercondensador igual al voltaje en circuito abierto de las MFCs, el voltaje podría estar por debajo de los requerimientos del convertidor DC-DC, además de que el rendimiento en este tipo de convertidores es bajo para voltajes de entrada pequeños.

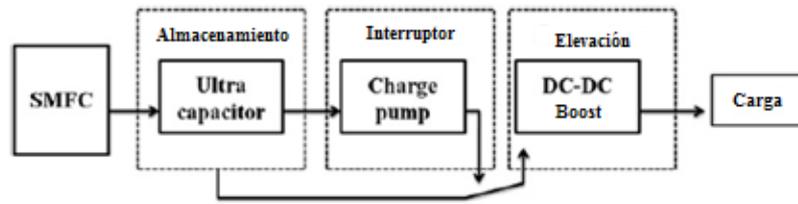


Figura 16-1: PMS tipo Capacitor-Convertidor
Fuente: (Zhang et al., 2011)

(Zhang et al., 2011) implemento un PMS para alimentar un sistema de transmisión de temperatura inalámbrica ubicado en lago Michigan hacia una PC remota. El PMS utilizaba un convertidor tipo charge pump ubicado entre el supercondensador y el convertidor DC-DC, cuyo objetivo era el de conectar el supercondensador al conversor DC-DC una vez alcanzado un nivel de voltaje y desconectarlo cuando se haya descargado a un nivel mínimo. El sistema funcionaba de una manera intermitente cuyo periodo depende de la potencia entregada por las MFCs y de la demanda total de energía de la carga la cual, afecta los valores de capacitancia del supercondensador.

1.3.4.2 Configuración charge pump-capacitor-convertidor

Este tipo de arquitectura es parecida a la configuración anterior con la diferencia de tener intercalado un conversor tipo Charge Pump entre la MFC y el Supercondensador, el mismo que tiene como objetivo aceptar voltajes y corrientes de entrada menores, permitiendo su utilización en MFCs con producciones pobres, pero los tiempos de carga pueden ser muy prolongados. El nivel de voltaje de salida alcanzado por un convertidor Charge-Pump es limitado en comparación a un conversor DC-DC tipo boost por lo cual es utilizado como una etapa previa a la salida final (figura 17-1). En la salida se suele utilizar un conversor tipo boost que por lo general dispone de módulos adicionales como salida de voltaje configurable, salida regulada, protección contra sobre corrientes y sobre temperatura.

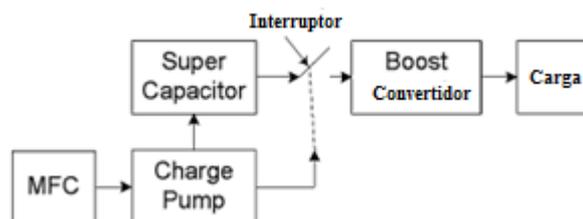


Figura 17-1: PMS tipo Charge pump-Capacitor-Convertidor
Fuente: (Meehan et al., 2011)

(Meehan et al., 2011) implemento un PMS de este tipo utilizando una MFC tipo reactor para alimentar un hidrófono cuyo charge pump, además de realizar la acción de carga previa, sirve como interruptor para conectar o desconectar el supercondensador del conversor DC-DC, en función del voltaje de carga. El tiempo de transmisión de datos fue de aproximadamente 10 horas, tiempo alto debido a la alta energía requerida para el funcionamiento del hidrófono y por la baja velocidad de extracción de energía por parte del conversor charge pump.

1.3.4.3 Configuración Capacitor-Transformador-Convertidor

Utiliza un conversor basado en transformador en lugar de un tipo Charge Pump. Las principales ventaja de este tipo de sistema es que puede funcionar con voltajes pequeños y con capacidad de extracción de energía veloz sin embargo, su eficiencia es menor en comparación a los conversores tipo Charge Pump y Boost. Esta arquitectura es útil en escenarios donde la eficiencia no es crítica, se requiere tiempos de carga bajos y voltajes de entrada pequeños.

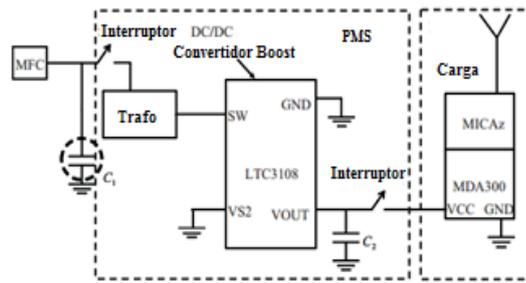


Figura 18-1: PMS tipo Capacitor-Transformador-Convertidor
Fuente: (Yang et al., 2012)

(Yang et al., 2012) implemento un PMS basado en transformador, capaz de alimentar un módulo de transmisión inalámbrica de datos de temperatura y humedad a una frecuencia promedio de 60 minutos, cuyos capacitores C1 y C2 (figura 18-1), debieron ser cuidadosamente seleccionados en función de la carga y el modelo eléctrico de la MFC; concluyendo que esta topología es útil para voltajes bajos de entrada y tiempos rápidos de carga pero sacrificando la eficiencia del sistema. La tabla 1-1 muestra un resumen de los sistemas expuestos anteriormente:

Tabla 1-1: Comparación de sistemas PMS

Tipo Diseño PMS	Localización del supercondensador	Ventaja	Desventaja
Condensador-convertidor	un supercondensador conectado directamente a una MFC	simple configuración	no puede arrancar al convertidor DC/DC si el voltaje en circuito abierto OCV es más bajo que el voltaje de ingreso requerido por el convertidor

Charge pump-condensador-convertidor	un supercondensador conectado entre un charge pump y un convertidor DC/DC	más alto voltaje de carga en el supercondensador	no puede cargar el supercondensador si el OCV de la MFC es más bajo que el voltaje de entrada requerido por el Charge Pump
Condensador-transformador-convertidor	dos supercondensadores: uno conectado directamente a una MFC y otro conectado entre un convertidor DC/DC y la carga	bajos voltajes de entrada hacia el PMS	se requiere de supercondensadores adicionales después del convertidor para mejorar el rendimiento en la carga

Fuente: (Zhang et al., 2012)

Realizado por: López, Denys; 2017.

(Zhang et al., 2012) evaluó el desempeño de los PMS tipo: Charge pump-condensador-convertidor y Condensador-transformador-convertidor, tomando como parámetros de interés el rendimiento alcanzado por cada sistema, voltajes mínimo de funcionamiento y sus ciclos de carga y descarga. Bajo este estudio llegaron a la conclusión de que el PMS basado en transformador es capaz de funcionar a un voltaje de entrada más bajo y con tiempos de carga y descarga mucho más cortos en comparación a un PMS basado en un conversor charge-pump sin embargo, la eficiencia alcanzada por este último fue ligeramente mayor. Bajo estos resultados se recomienda utilizar un PMS basado en transformador en MFCs con voltajes de producción bajos y en donde se requiera de tiempos de carga y descarga cortos mientras que, es mejor utilizar un sistema basado en un conversor charge-pump cuando el rendimiento es crítico y los tiempos de carga y descarga sean altos.

1.3.4.4 Otros tipos de sistemas

Varios sistemas han sido propuestos con el fin de mejorar el rendimiento, disminuir los tiempos de carga y descarga, adaptarse a los cambios de las MFCs, adaptación de impedancias, etc (Wang et al., 2015). Por ejemplo (Gao et al., 2011) utilizaron un sistema en el cual dos condensadores son cargados individualmente por su respectiva MFC los cuales, una vez alcanzada su carga máxima, son desconectados e inmediatamente conectados en una configuración en serie, mediante la ayuda de circuitos de conmutación, con el fin de obtener un voltaje de entrada hacia el conversor DC-DC tipo boost igual a la suma de los voltajes aportados por ambos condensadores. Con la implementación de este sistema lograron conseguir una mejora en el rendimiento del 79 por ciento en relación a que si se hubiera utilizado dos configuraciones simples tipo condensador-convertidor.

Existen sistemas que implementan mecanismos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) los mismos que son capaces de seguir el punto de máxima potencia de las MFCs, con la finalidad de extraer la energía operando lo más cercanamente posible al MPP, reflejándose en

tiempos de carga y descarga mucho más cortos y en la mejora de la eficiencia Coulómbica. (Wang et al., 2015). Otros métodos de MPPT reportados son: método de perturbación y observación, método parcial de voltaje en circuito abierto, método de multi-unidad, etc. (Wang et al., 2015)

1.4 Red inalámbrica de sensores (WSN)

Es un tipo de red compuesta por sensores inalámbricos que cooperan entre sí para censar grandes entornos físicos (Waltenegus Dargie y Christian Poellabauer, 2010, p.7). Un sensor inalámbrico permite realizar tareas de censado cuya información es transmitida hacia una estación de procesamiento centralizada mediante dispositivos de comunicación de radiofrecuencia, además de poseer capacidades de procesamiento, comunicación y almacenamiento; esto es importante especialmente cuando se requiere ubicar sensores en áreas remotas e inaccesibles.

El proceso de censado permite extraer información del mundo físico, eventos, fenómenos, objetos, tales como: temperatura, presión, radiación, posición, etc. mediante dispositivos denominados sensores. En si un sensor convierte un tipo de energía en otro esto es, energía proveniente del mundo físico en energía eléctrica la cual puede ser medida y analizada con el fin de tomar alguna decisión o para ser almacenada. (Dargie y Poellabauer, 2010, p.4)

1.4.1 Componentes de una WSN

Una WSN está compuesta principalmente por uno o varios nodos sensores que cooperan entre sí, con el fin de enviar la información recolectada hacia una estación base con capacidades computacionales figura (19-1).

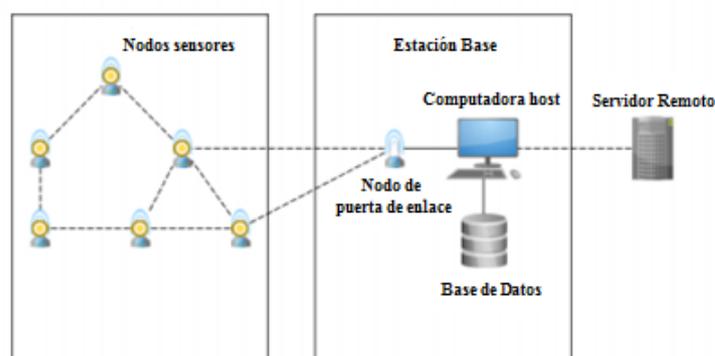


Figura 19-1: Red de sensores inalámbricos

Fuente: (Michal Michalík, 2013, p. 6)

1.4.1.1 Nodo sensor

Es el dispositivo responsable de realizar la tarea de censado y transmitir la información recolectada hacia la estación base a través de uno o múltiples saltos además, cumple con la función de retransmitir la información provista por sus vecinos con la finalidad de poder cubrir áreas mucho más amplias (sensor field), acorde a ciertas decisiones de enrutamiento. (Carlo Fischione, 2014, p.17)



Figura 20-1: Estructura básica de nodo sensor
Fuente: (Carlo Fischione, 2014, p.17)

Como se puede observar en la figura 20-1, un nodo sensor se encuentra conformado por:

-**Sensor.**- dispositivo encarga de adquirir información de su entorno físico.

-**Actuador.**- dispositivo que permite realizar alguna acción mecánica bajo algún criterio.

-**Dispositivo de comunicación.**- permite realizar tareas de transmisión y recepción hacia otros componentes de la red.

-**Memoria.**- permite almacenar temporalmente la información de censado en memorias de tipo RAM, ROM y sus derivados.

-**Fuente de alimentación.**- dispositivo encargado de proveer de la energía necesaria para el funcionamiento del nodo. Puede estar compuesta simplemente por una batería o incluso poseer mecanismos más complejos como sistemas de administración de energía que permiten recolectar energía de diferentes fuentes (eólico, solar, térmico, químico) y almacenarla en un dispositivo de almacenamiento.

-**Controlador.**- dispositivo encargado de realizar tareas de procesamiento que conjuntamente con los demás dispositivos, permite cumplir con las tareas de censado y enrutamiento del nodo sensor.

Debido a que usualmente son alimentados mediante baterías, estos tipos de nodos deben mantener mecanismos de ahorro de energía, como mantener un estado de reposo cuando no se requiera de ninguna tipo de transmisión.

1.4.1.2 Estación base

Es un sistema cuyo principal objetivo es el de recolectar la información procedente de los nodos sensores pertenecientes a la red para su almacenamiento, análisis y visualización; el almacenamiento de los datos puede ser local o incluso pueden ser enviados a un servidor remoto. En algunos casos la estación base se encarga de tareas administrativas de la red como configuración de nodos y enrutamiento, por lo que debe poseer una capacidad computacional mucho mayor a la de un nodo sensor convencional además de tener una fuente de alimentación más estable y confiable que permita su funcionamiento ininterrumpido (Michal Michalík, 2013, p. 5-6).

La estación base se encuentra conformada por:

-Nodo Gateway.

Nodo sin ningún tipo de sensor que permite adquirir los datos procedentes de los diferentes nodos sensores de la red a través de un dispositivo de radiofrecuencia, y enviarlos hacia un sistema computacional con el fin de almacenarlos, procesarlos y visualizarlos.

-Computadora Host.

Sistema de cómputo capaz de interactuar con el nodo gateway, con el fin de realizar tareas de adquisición, administración y configuración de la red además de poder almacenar la información en una base de datos para su posterior análisis y/o visualización. En conjunto con el hardware, trabaja un sistema de software con el propósito de controlar los dispositivos y recursos del sistema.

1.4.2 Topologías de WSN

Las redes WSN pueden adoptar diferentes topologías en función de las necesidades requeridas tales como: cobertura, seguridad, recursos, escalabilidad, latencia, consumo, etc; con diferentes topologías acorde a las necesidades del usuario. Los más comúnmente encontrados y soportados por diferentes dispositivos de radiofrecuencia comerciales son:

1.4.2.1 Topología en estrella

Esta topología se da cuando el rango de transmisión los nodos sensor de la red son capaces de establecen una comunicación directa con la estación base en un solo salto. La comunicación entre nodos sensor vecinos no es permitida y la única comunicación permitida es con el nodo coordinador o gateway ubicada en la estación base. Su implementación es sencilla y ocupa muy pocos recursos sin embargo tiene la desventaja de cubrir áreas limitadas.

1.4.2.2 Topología en árbol

Topología que extiende la tradicional configuración en estrella pudiendo existir múltiples coordinadores interconectados entre sí, pero solo uno cumple el papel de nodo principal que asigna el PAN ID de la red. Se basa en conexiones punto a punto abriendo su comunicación en forma de ramas manteniendo las tareas de enrutamiento lo más simples posibles.

1.4.2.3 Topología en malla

Hay ocasiones en las que la red debe cubrir áreas geográficas extensas donde la potencia de transmisión de los dispositivos de radiofrecuencia es incapaz de cubrir dichas distancia, o es poco práctica la utilización de dispositivos de transmisión de largas distancias debido a su alto consumo en cuyo casos, se suele utiliza topologías más sofisticadas donde la información puede realizar múltiples saltos entre nodos con el fin de alcanzar la estación base. En la configuración tipo malla los nodos sensor no solo realizan la función de adquirir y transmitir su propia información sino, deben tener la capacidad de colaborar con sus nodos vecinos con el fin de transmitir la múltiple información hacia la estación base (Carlo Fischione, 2014, p.19).

1.4.3 Estándar IEEE 802.15.4

La arquitectura del estándar IEEE 802.15.4 se define en términos de bloques denominados capas con el fin de simplificar su diseño donde cada capa ofrece servicios a sus capas superiores. El estándar IEEE 802.15.4 define las especificaciones para la capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) para aplicaciones de comunicación inalámbricas de baja velocidad de transmisión de datos, ultra baja complejidad, ultra bajo consumo y precio, para operar en una variedad de bandas de frecuencias para cubrir diferentes áreas geográficas. (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.35). La especificación permite la creación de redes de área personal inalámbricas de bajas tasa de transferencia de datos (LR-WPAN) y permite la implementación de dos tipos de dispositivos:

-**Dispositivo de función completa (FFD)**: es un dispositivo capaz de funcionar como un coordinador en una red de área personal.

- **Dispositivo de función reducida (RFD)**: diseñadas para aplicaciones extremadamente simples como iluminación, sensores infrarrojos pasivos, interruptores; donde no se requiere del envío de una considerable cantidad de datos, los mismos que solo se puede asociar con otro dispositivo RFD a la vez (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.44).

1.4.4 Componentes de una red WPAN con IEEE 802.15.4

Conformado por varios componentes entre ellos el más básico, un dispositivo con una interfaz de radiofrecuencia que implemente la especificación tanto a nivel de capa física como a nivel de MAC. Dos o más dispositivos comunicándose en el mismo canal físico constituyen una WPAN la cual debe incluir al menos un dispositivo FFD operando como coordinador PAN (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.45).

1.4.5 Topologías permitidas en el estándar IEEE 802.15.4

El estándar IEEE 802.15.4 permite la creación de dos tipos de topologías de red: estrella y punto a punto (figura 21-1), donde los dispositivos tienen asociados una única dirección dentro de la red ya sea de tipo extendida o corta, con la finalidad de establecer comunicación dentro de la red.

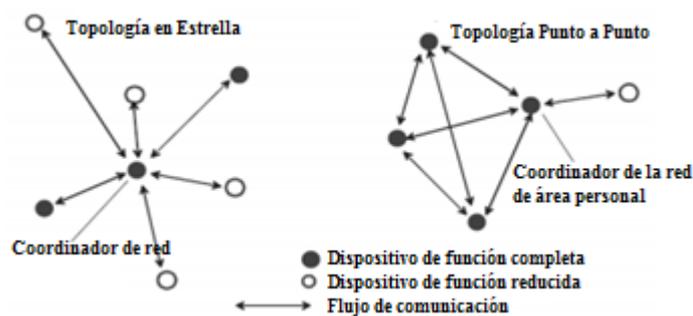


Figura 21-1: Formación de redes tipo estrella y punto a punto
Fuente: (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.46)

1.4.6 Red tipo estrella IEEE 802.15.4

Este tipo de topología de red requiere de al menos un dispositivo FFD funcionando como coordinador de la WPAN. El dispositivo coordinador FFD al iniciar crea su propia red

independiente de otras redes ya en funcionamiento y con un identificador PAN ID único no utilizado por otra red dentro del rango de cobertura del dispositivo. Una vez establecida la red, el coordinador permitirá la unión a la red de dispositivos ya sea de tipo RFF y/o RFD. Aplicaciones dentro de este tipo de topología incluyen: domótica, periféricos de computadoras personales, redes de sensores, juegos, cuidado de salud personal, etc. (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.46-47)

1.4.7 Red tipo punto a punto IEEE 802.15.4

En este tipo de topología de red, la comunicación se da únicamente entre dispositivos FFD, con comunicación de dispositivo a dispositivo de uno a la vez, siempre y cuando su rango de alcance así lo permita además, debe existir un dispositivo coordinador con un identificador PAN ID único pero a diferencia de la topología en estrella, los dispositivos periféricos pueden entablar una comunicación directa entre ellos acorde a su rango de alcance (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011, 2015, p.47).

La comunicación punto a punto permite la formación de redes más complejas como lo son la tipo árbol y la tipo malla, que mediante las debidas implementaciones de capas superiores, ofrecen servicios de enrutamiento, seguridad, encriptación, corrección de errores, etc que el estándar IEEE 802.15.4 por sí solo no cubre. Con la utilización de esta topología se pueden cubrir necesidades tales como: monitorización y control industrial, redes de sensores inalámbricos, seguimiento de inventario, agricultura inteligente y seguridad.

1.5 Elementos hardware

1.5.1 UDOO

UDOO es un Mini PC de tarjeta de código y hardware abierto, compatible con sistemas operativos como Android y Linux, cuya característica más destacable es la integración de una placa Arduino en su hardware, accesible por el sistema operativo del host. UDOO dispone de tres presentaciones: UDOO QUAD/DUAL (2013), UDOO NEO (2015), UDOO X86 (2016), con diferentes características que se ajustan a diferentes necesidades (figura 22-1).



QUAD/DUAL



NEO



X86

Figura 22-1: Mini PCs UDOO

Fuente: (<https://www.udoo.org/docs-neo/Introduction/Introduction.html>)

UDOO QUAD/DUAL.- placa ideal para un rápido desarrollo de prototipos, que cuenta con soporte para Arduino y Linux, llegando a ser tener una capacidad de procesamiento similar al de una placa Raspberry Pi 3.

UDOO NEO.- placa ideal para proyectos y aplicaciones que requieren de un muy bajo consumo de energía con soporte para Arduino y Linux. Puede ser utilizado para el desarrollo de drones, carros de exploración, robótica, etc.

UDOO X86.- estimado como la computadora de tarjeta más poderosa en el mundo; cuenta con un procesador de 64 bits Intel-powered x86 de cuatro núcleos, con soporte para Linux, Windows, Android y Arduino, ideal para la reproducción fluida de contenido multimedia.

1.5.2 Familia de Microcontroladores PIC

Son una familia de microcontroladores de 8, 16 y 32 bits, con una arquitectura poderosa, herramientas de desarrollo fáciles de entender y usar, documentación técnica completa y ampliamente distribuidos a nivel mundial. Disponen de recursos que facilitan la comunicación entre diferentes dispositivos a través de interfaces como: SPI, I2C, UART, CAN, USB, Ethernet, IrDA, LIN; conversión de señales A/D y D/A, amplificadores operacionales, contadores de captura y comparación, comparadores analógicos, reloj en tiempo real, salidas PWM, controladores de pantallas LCD simples y táctiles. La tabla 2-1 muestra las características más importantes de cada familia.

Tabla 2-1: Características de familia de microcontroladores PIC

Familia PIC	Características destacables
8 bits	Tecnologías de bajo consumo picoPower y XLP; protección contra EMI/EMC; configuración grafica de sistemas complejos, microcontrolador ampliamente extendido en la industria
16 bits	Integración de periféricos de alto rendimiento para comunicaciones; control y conversión de señales con núcleo independiente; bajo consumo y precio

32 bits	Microcontroladores de alto rendimiento, amplia memoria de configuración y usuario, velocidad de reloj hasta 120Mhz, útil para desarrollo de sistemas embebidos de propósito general, audio, conectividad y gráficos.
---------	--

Fuente: (<https://www.microchip.com>), Realizado por: López, Denys; 2017.



Figura 23-1: Pic 16f628a empacado 18-pin DIP
Fuente: (<http://ww1.microchip.com>)

1.5.3 Sensores

Los sensores utilizados en el nodo sensor, dependen de la aplicación que se tenga en mente aplicar, pudiendo ser clasificados principalmente de acuerdo al tipo de señal que entregan analógica o digital, si requieren o no de una fuente de alimentación externa para su funcionamiento activos o pasivos, según la variable física a medir temperatura, humedad, luz, sonido, etc. . Hoy en día podemos encontrar en el mercado diferentes sensores integrados en placas de circuito impreso (figura 24-1), listos para ser usados e integrarlos a un sistema digital, ya sea a través de una conversión digital de la señal analógica previamente acondicionada o que entregan directamente la variable mediada a través de un protocolo digital de comunicación como: SPI, USART, I2C, 1Wire, etc.



Figura 24-1: Ejemplo de Sensores
Fuente: (<https://www.robotshop.com/en/gravity-advance-sensor-set-arduino.html>)

1.5.4 Digi XBee 802.15.4

Es una familia de dispositivos de comunicación de radiofrecuencia de bajo costo, fácil utilización, baja velocidad y consumo, con soporte para protocolos basados en el estándar 802.15.4 para brindar conectividad entre dispositivos y sensores; son aptos para aplicaciones con transmisión de datos a bajas velocidades a tiempos predecibles, ofreciendo conectividad robusta y sencilla en configuraciones punto a punto, multipunto y estrella.



Figura 25-1: Módulo RF XBee 802.15.4 S2C

Fuente: (<https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/2-4-ghz-modules/xbee-802-15-4#specifications>)

Las características destacables de los módulos RF XBee 802.15.4 son:

- Configuración sencilla a través de comandos AT o software de configuración XCTU
- Topología de red punto a punto, multipunto y estrella
- Banda de trabajo a 2.4 GHz
- Consumo de energía en modo sleep de 1uA
- Actualización de firmware por UART, SPI o comandos AT
- Soporte para protocolos DigiMesh y ZigBee PRO
- Interface de comunicación SPI y UART
- Entradas y salidas digitales
- Conversor A/D de 10 bits
- Voltaje de alimentación de 2.8 a 3.4VDC

1.5.5 Termómetro datalogger HH309

Este instrumento permite obtener lecturas de temperatura de cuatro canales de termocuplas tipo K, pudiendo ser visualizadas en el lcd del dispositivo, almacenarlas en su memoria interna de hasta 16000 muestras por canal o comunicarse a través de rs232 a una PC. El rango de temperatura de censado es de -200 a 1370 grados centígrados con una resolución de 0.1.

Dispone de su propio software para la configuración, descarga y visualización en tiempo real de los datos censados.



Figura 26-1: Termómetro datalogger HH309
Fuente: (<https://www.omega.com/manuals/manualpdf/M4147.pdf>)

1.5.6 NI USB 6009

Dispositivo multifunción usb, que ofrece 8 entradas analógicas simples de 13 bits de resolución, o 4 diferenciales de 14 bits de resolución, a una velocidad máxima de 48kS/s; 2 salidas analógicas; 12 canales entradas/salidas digitales y un contador de 32 bits. Para su configuración, programación y visualización de datos, el dispositivo utiliza el software Labview el cual, permite un enfoque de programación, depuración y configuración gráfica, que facilita y disminuye el tiempo de desarrollo de aplicaciones.



Figura 27-1: NI USB 6009
Fuente: (<http://www.ni.com/es-cr/support/model.usb-6009.html>)

CAPÍTULO II

2 DISEÑO DE HARDWARE Y SOFTWARE DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta el diseño de hardware, software y construcción del equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas. Se describe los requisitos hardware y software que debe cumplir, su arquitectura general, los subsistemas que lo conforman, los requerimientos técnicos que deben cumplir, así como los dispositivos electrónicos requeridos para su implementación.

2.1 Requisitos hardware del sistema

Los requerimientos de hardware que debe cumplir el equipo de monitoreo inalámbrico alimentado mediante celdas de combustible microbianas para el CEEA de la ESPOCH son:

- Tener la capacidad de adquirir datos de un sensor o sensores, procesarlos, almacenarlos y poder visualizarlos a través de una aplicación informática.

- Proveer transmisiones confiables y estables, en su rango delimitado de funcionamiento.

- Obtener una eficiencia aceptable en el funcionamiento de los circuitos de almacenamiento y conversión de energía eléctrica.

- Implementar un equipo de bajo costo, evitando desperdicio de recursos de hardware.

- Permitir al usuario consultar los datos obtenidos mediante gráficas y tablas, además de poder descargarlos fácilmente.

2.2 Concepción de la arquitectura general del sistema

El gráfico 1-2 muestra el diagrama en bloques simplificado de arquitectura del sistema el cual, sigue el modelo de una red WSN tipo punto a punto acorde al estándar IEEE 802.15.4, pudiendo extenderse a una topología tipo estrella; compuesta por un nodo sensor y una estación base comunicándose a través de módulos de radiofrecuencia con capacidad de soportar un protocolo de comunicación basado en el estándar anteriormente mencionado.

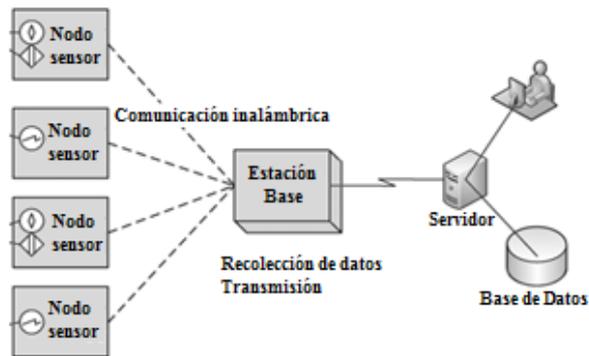


Gráfico 1-2: Diagrama general de funcionamiento del sistema
 Fuente: (<http://ieeexplore.ieee.org/document/6963375/>)

La elección de esta topología se debe a que un nodo sensor alimentado mediante MFCs es incapaz de funcionar de una manera continua, debido a la limitada potencia que estas entregan, razón por la cual podrá funcionar únicamente de manera intermitente y como dispositivo de función reducida RFD, además de la menor energía requerida para su funcionamiento en comparación a topologías tipo malla (MESH) y árbol (TREE), y de la sencillez en su implementación. El sistema a implementar no requiere de elevadas velocidades de transmisión debido a que, se enviarán muy pocos datos y solo a intervalos de tiempo relativamente prolongados y a una distancia no muy extensa por lo cual, como se observa en la figura 1-2, el estándar 802.15.4 cumple con las características deseadas en nuestro sistema, dejando de lado tecnologías como Wifi, Bluetooth, Wimax, 2G, 3G, etc.

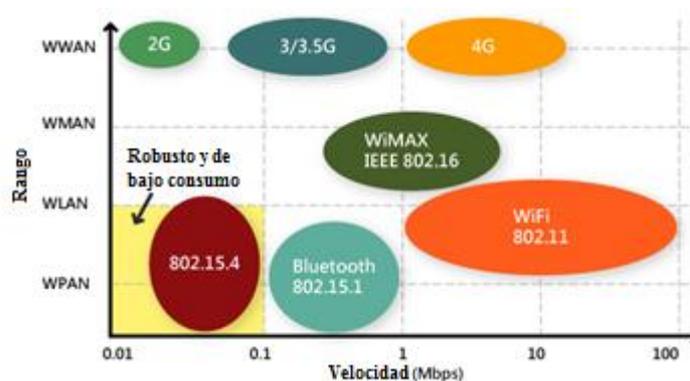


Figura 1-2: Tecnologías utilizadas en redes inalámbricas
 Fuente: (http://www2.advantech.eu/it/edm/2011_WSN/index_flash.htm)

2.3 Diseño de arquitectura del sistema

Una vez definidos los requerimientos del sistema, se presenta el diseño de cada uno de los módulos que conforman el equipo de monitoreo inalámbrico alimentado mediante celdas de combustible microbianas.

2.3.1 Diseño del nodo sensor

El nodo sensor requiere de un diseño cuidadoso debido a la limitada cantidad de energía eléctrica obtenida de las MFCs, debiendo optimizarse al máximo el consumo por parte de la carga, así como la utilización de un sistema PMS con un rendimiento aceptable. El gráfico 2-2 muestra los principales elementos que conforman un nodo sensor, compuesto por:

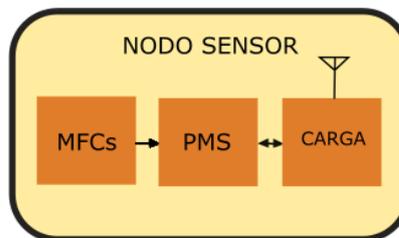


Gráfico 2-2: Diagrama de bloques del nodo sensor
Realizado por: López, Denys; 2017.

-Dispositivo o fuente de alimentación (MFCs),- encargado de proveer de la energía necesaria para el funcionamiento de la carga, compuesto por las celdas de combustible microbianas.

-Sistema de administración de energía (PMS),- circuito electrónico encargado de tomar la energía proveniente de las MFCs y transformarla a una forma útil para alimentar a la carga.

-Carga(Transmisor RF, Sensores),- encargado de adecuar, recolectar, procesar y transmitir las señales provenientes del entorno físico, mediante la utilización de sensores, controladores, módulos de radiofrecuencia y dispositivos electrónicos necesarios para cumplir con dicho fin.

2.3.2 Diseño de la Estación base

La estación base no requiere de un funcionamiento intensivo, ni de una capacidad de procesamiento elevada sin embargo, debe poseer los recursos adecuados que permitan recolectar, procesar, almacenar y permitir consultar los datos obtenidos del nodo sensor de una

manera segura y adecuada. El gráfico 3-2 muestra los principales elementos que conforman la estación base, compuesto por:

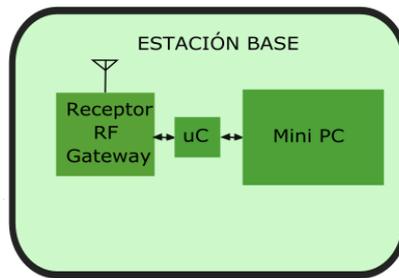


Gráfico 3-2: Diagrama de bloques de la estación base
Realizado por: López, Denys; 2017.

-Receptor RF Gateway.- dispositivo encargado de recibir los datos enviados por él o los nodos sensores y enviarlos al sistema de cómputo o host, así como la administración y coordinación de la red.

-Mini PC HOST.- computadora de tamaño reducido y recursos limitados, encargado de almacenar, procesar y presentar los datos provistos por el o los nodos sensores.

-Circuito controlador. - circuito electrónico encargado de la comunicación entre el receptor RF y el mini PC.

2.4 Selección de elementos del equipo de monitoreo

A continuación se detallan los elementos utilizados para la implementación del equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante MFCs.

2.4.1 Elementos de la carga

El gráfico 4-2 muestra el diagrama en bloques de la carga, que es un sistema electrónica cuyo propósito es el de adquirir un dato de temperatura provisto por un sensor y enviarlo a la estación base a través de un módulo de radiofrecuencia; un microcontrolador es utilizado para administrar y controlar el sistema. La transmisión es de manera intermitente y directa a la estación base, cuya frecuencia de transmisión dependerá de la capacidad de potencia entregada por las MFCs, lo cual implica que el único tiempo de consumo de la carga será en el momento de transmisión.

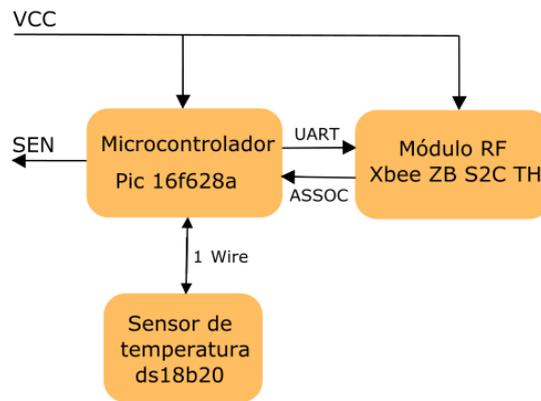


Gráfico 4-2: Diagrama de carga
Realizado por: López, Denys; 2017.

Los principales requerimientos que se deben cubrir son los siguientes:

- Proveer comunicación entre nodos sensor y estación base a la distancia requerida, minimizando las pérdidas de información.
- Recibir, adecuar y transmitir la señal proveniente del sensor.
- Minimizar el consumo energético del sistema.
- Evitar el consumo innecesario de energía una vez culminada la transmisión.

Establecidos los requerimientos de la carga, se establecerán los elementos que lo conforman.

2.4.1.1 Módulo de radiofrecuencia XBee ZB S2C TH



Figura 2-2: módulo XBee ZB S2C TH

Fuente: (<https://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/2-4-ghz-modules/xbee-zigbee>)

El módulo de radiofrecuencia debe soportar el estándar IEEE 802.15.4 para comunicación punto a punto, además de poseer un bajo consumo y de tener una cobertura adecuada. La distancia que se debe cubrir se muestra en la gráfico 5-2 cuyas ubicaciones son las siguientes:

Nodo sensor.- Edificio Investigación ESPOCH

Estación base.- CEEA Ciencias

-1.655221, -78.678937

-1.655730, -78.678928



Gráfico 5-2: Puntos de transmisión nodos ESPOCH

Fuente: (<https://www.google.com.ec/maps/@-1.6556033,-78.6786753,203m/data=!3m1!1e3>)

Por tanto, el módulo de radiofrecuencia, para las pruebas, debe cubrir una distancia mínima aproximada de 61,91 metros sin embargo, para aplicaciones en campo, el rango de cobertura requerido podría ser mayor. El módulo seleccionado para el sistema, que cumple con los requerimientos deseados, es el módulo XBee ZB S2C TH.

Las características destacables son su rango de cobertura superior a 1 kilómetro con una corriente de consumo razonable en modo de transmisión de 33mA; un rango de voltaje de alimentación de 2.1V a 3.6V a una potencia de salida de 3.1mW, soportando un protocolo de comunicación de bajo consumo basado en el estándar IEEE 802.15.4 el cual, permite topologías tipo punto a punto y estrella, crucial para el tipo de aplicación implementado además, de permitir la comunicación interna entre el módulo y el microcontrolador, mediante una comunicación tipo serial asíncrona UART o SPI.

Adicionalmente el módulo dispone de un terminal de asociación (ASSOC), el cual indica si se ha establecido comunicación con otro módulo de radio frecuencia y/o el módulo se encuentra preparado para transmitir; la señal entregada por el terminal puede ser configurada como un pulso de alto a bajo, bajo a alto, o un conjunto de pulsos. Esta característica del dispositivo permitirá sincronizar el envío de datos con el fin de evitar pérdidas en el caso de que el dispositivo no se encuentre preparado.

2.4.1.2 Sensor ds18b20



Figura 3-2: Sensor de temperatura ds18b20

Fuente: (<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>)

El sensor seleccionado para el sistema, es el sensor de temperatura ds18b20, principalmente debido a sus características de bajo consumo, rápida respuesta y de solo requerir de una resistencia pull-off de 4.7 K Ω para su funcionamiento; entrega una señal digital de temperatura digital bajo el protocolo de comunicación 1wire con una resolución de 9 a 12 bits programable, en un rango de medición de temperatura de -55°C a +125°C; su rango de voltaje de funcionamiento es de 3.0 a 5.5 voltios con un consumo de corriente típico de 1 miliamperio. El tiempo de conversión dependerá de la resolución del dispositivo con tiempos máximos de conversión de 93.75, 187.5, 375, 750 ms a una resolución de 9, 10, 11 y 12 bits respectivamente. La configuración del sensor de temperatura acorde al datasheet del dispositivo es el mostrado en la figura 4-2 el cuál, se alimenta de 3.3 V y se comunica con el microcontrolador a través del protocolo 1 Wire.

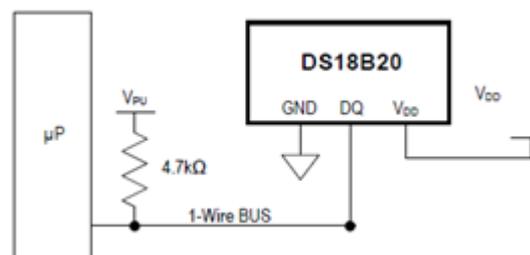


Figura 4-2: Conexión básica con alimentación externa ds18b20

Fuente: (<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>)

2.4.1.3 Microcontrolador Pic 16f628a



Figura 5-2: Pic 16f628a empacado 18-pin DIP

Fuente: (<https://www.neoteo.com/8-canales-de-pwm-con-un-16f628a/>)

El Pic 16f628a es un microcontrolador de 8 bits diseñado con tecnología CMOS, cuya arquitectura es de tipo Harvard (bus de datos e instrucción separados). Posee un set de 35 instrucciones reducidas capaces de correr en un solo ciclo de reloj a excepción de las instrucciones de salto que requerirán de dos ciclos. Además es capaz de funcionar bajo un amplio rango de velocidades de reloj provenientes de un oscilador externo (RC, cristal), una señal externa o utilizando su propio oscilador interno de precisión. La tabla 1-2 muestra las características más importantes del dispositivo.

Tabla 1-2: Características del PIC 16f628a

RELOJ	Máxima frecuencia de operación (Mhz)	20
MEMORIA	Memoria FLASH de programa (palabras)	2048
	Memoria de datos RAM (bytes)	224
	Memoria de datos EEPROM (bytes)	128
PERIFÉRICOS	Módulos TIMER	TMR0, TMR1, TMR2
	Comparadores	2
	Módulos Captura/Comparación/PWM	1
	Comunicación Serial	USART
	Referencia Interna de Voltaje	Yes
CARACTERÍSTICAS	Interrupciones	10
	I/O Pines	16
	Voltaje de operación (voltios)	3.0-5.5
	Brown-out reset	Yes
	Empacado	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN

Realizado por: López, Denys; 2017.

Una de las características más destacables del pic 16f628a es su bajo consumo, tanto en modo de operación como en modo stand-by, lo cual lo hace ideal para aplicaciones donde el consumo

de energía es crítico, manteniendo un compromiso entre precio, rendimiento, flexibilidad, facilidad de uso y versatilidad. El PIC 16f628a posee recursos y características útiles para controlar el sistema transmisor tales como: interrupción por señal externa, watchdog timer, modo sleep de bajo consumo y comunicación serial UART, los cuales son utilizados en el sistema de la siguiente manera:

-Interrupción RBO.- conectado al terminal de asociación del módulo de radiofrecuencia Xbee el cual se activa una vez el módulo se encuentra listo para transmitir.

-Watchdog timer.- reinicia el microcontrolador una vez haya transcurrido 2304 milisegundos, esto permite establecer un timeout de 2,3 segundos en caso de que el módulo Xbee nunca llegue a inicializarse.

-UART.- modulo utilizado para la comunicación entre el microcontrolador y el módulo de radiofrecuencia Xbee.

Para minimizar el consumo del microcontrolador se recomienda, inhabilitar módulos y/o periféricos que no se requiera su utilización tales como: el módulo brown out reset, comparadores, voltaje de referencia o cualquier otro recurso que pueda consumir energía.

2.4.2 Elementos del Sistema de Administración de Energía (PMS)

El sistema de administración de energía PMS es el corazón del sistema nodo sensor, cuyas características dependen de los valores de voltaje y corriente entregada por las MFCs e igualmente por los valores de voltaje y corriente requeridos por la carga, para ello el diseño del PMS fue realizado de acuerdo a los siguientes requerimientos:

-Almacenar la energía suficiente para poner en funcionamiento la carga.

-Abastecer plenamente de los niveles voltaje y corriente requeridos por la carga.

-Mantener una eficiencia aceptable.

-Desconexión de la carga del sistema cuando sea requerido para evitar consumos innecesarios.

-Extracción de energía eficiente.

-Voltaje de alimentación lo más bajo posible y una demanda de corriente suficientemente baja para arrancar y mantener el sistema en funcionamiento.

En el diseño de sistemas PMS para extracción de energía en MFCs, el circuito charge pump Seiko S-882Z ha sido ampliamente utilizado para permitir un voltaje de alimentación tan bajo como 0.3V con una eficiencia aceptable sin embargo, el circuito hoy en día se encuentra discontinuado además de ser demasiado lento en la tarea de extraer energía con lo cual, este dispositivo queda descartado del diseño del PMS; otra opción es utilizar topologías basadas en transformador los cuales permiten voltajes de entrada aún más bajos que el Seiko S-882Z y tiempos de extracción bastante rápidos sin embargo, la eficiencia puede ser comprometida en el caso de no tener un correcto diseño y dimensionamiento en los dispositivos de almacenamiento.

Hoy en día los fabricantes de dispositivos electrónicos desarrollan convertidores y dispositivos de extracción de energía cada vez más eficientes y con características orientadas a aplicaciones de baja potencia, con lo cual se realizó una búsqueda de dispositivos que puedan cubrir con los requerimientos anteriormente establecidos. Los dispositivos con características más destacables encontrados para el diseño del sistema PMS, son los circuitos bq25505 y tps61200 de Texas Instruments los cuales para su funcionamiento, requieren de dispositivos de almacenamiento como baterías, condensadores o supercondensadores, y de dispositivos de control como relés de estado sólido.

2.4.2.1 Circuito integrado bq25505



Figura 6-2: Bq25505 y placa de evaluación
Fuente: (<http://www.ti.com/tool/bq25505evm-218>)

El bq25505 es un circuito integrado capaz de extraer, almacenar y elevar el nivel de voltaje de energía eléctrica proveniente de diferentes fuentes generadoras, con características de baja potencia que oscilan en el orden de los micro y mili watts de una manera eficiente, además de permitir al usuario configurar valores de voltaje para la protección del dispositivo de almacenamiento contra sobretensión y baja tensión, así como un rango de voltajes que indiquen cuando la carga del dispositivo de almacenamiento (capacitor, supercapacitor, batería

recargable) se encuentre en un nivel óptimo para su utilización. Puede operar con un voltaje mínimo de 100mV con una corriente de quiescente de 325nA, con la capacidad de trabajar con fuentes de energía de alta impedancia.

Además permite la conexión de una fuente de energía no recargable (batería, pila, celda), con el fin de proveer la energía necesaria para el funcionamiento del dispositivo de consumo, cuando el dispositivo de almacenamiento no se encuentre en un nivel óptimo de voltaje, permitiendo así la implementación de sistemas híbridos. Una de sus características más destacables, es su módulo programable de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) el cual, debe ser configurado para establecer el punto de máxima potencia a la cual se encuentra la fuente generadora a ser utilizada, con el propósito de obtener una alta eficiencia al momento de la extracción de energía.

2.4.2.2 Circuito integrado TPS61200



Figura 7-2: Tps61200 y placa de evaluación

Fuente: (<https://www.tindie.com/products/BBTech/tps61200-booster-module/>)

El circuito integrado TPS61200 es un convertidor dc-dc tipo boost, capaz de ser alimentado mediante voltajes tan bajos en el rango de 0.3V hasta 5.5V, con una salida de voltaje regulado establecido mediante resistencias externas desde 1.8V hasta 5.5V y capaz de soportar una corriente de salida máxima de 600mA a 5V o de 300mA a 3.3V. La corriente de quiescente del dispositivo es de menos de 55uA y una corriente de entrada promedio máxima de 1500mA. El TPS61200 además dispone de un mecanismo de protección contra sobre temperatura y un módulo contra bajo voltaje de entrada, programable mediante resistencias externas.

2.4.2.3 Optomofet LBA716



Figura 8-2: Optomofet LBA716

Fuente: (<https://www.mouser.com/ProductDetail/IXYS-Integrated-Circuits/LBA716S?>)

Es un circuito integrado compuesto por dos relés de estado sólido tipo optomofet, un normalmente abierto y un normalmente cerrado, capaz de soportar cargas de 60V a 1 A con una resistencia interna equivalente de 0.4Ω . Provee un aislamiento de 3750 Vrms entre el control y la carga, compatible con tecnologías de activación TTL y CMOS, además de no generar señales EMI y RFI.

2.4.3 Configuraciones de circuitos del PMS

Los convertidores, cargadores, dispositivos de almacenamiento, relés de estado sólido y otros dispositivos electrónicos; trabajan en conjunto para conformar el sistema PMS como se puede observar en el gráfico 6-2.

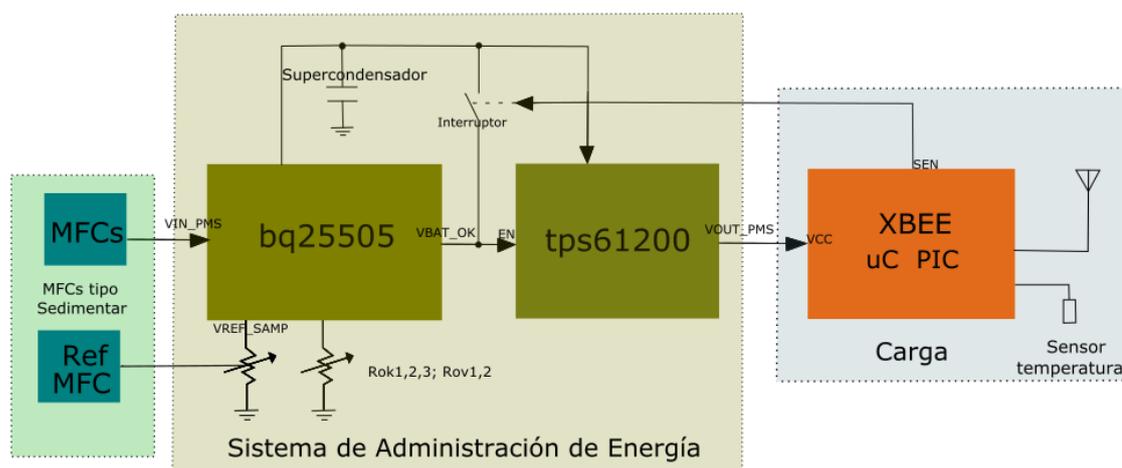


Gráfico 6-2: Diagrama de bloque del sistema de administración de energía
Realizado por: López, Denys; 2017.

El circuito integrado bq25505 cumple con la función de extraer la energía procedente de las MFCs aceptando un voltaje de entrada mínimo de 100mV y almacenarla en un supercondensador con un voltaje mayor comprendido entre 2 y 5.5V, además tiene la capacidad de activar una señal de salida (V_{BAT_OK}), advirtiéndole que el supercondensador ha alcanzado un nivel de voltaje deseado y se desactivará al descender por debajo de un valor establecido por el usuario; el comportamiento de la señal V_{BAT_OK} es programable mediante las resistencias externas R_{ok1} , R_{ok2} y R_{ok3} . Uno de los puntos más destacables del bq25505 es su módulo de seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) el cual, utiliza una MFC de referencia (Ref MFC) conectada hacia un potenciómetro con derivación al terminal V_{REF_SAMP} del bq25505, con el fin de calibrar el nivel de voltaje al cual debe trabajar el módulo MPPT cuyo valor se lo obtiene de la curva de polarización de las MFCs.

El circuito integrado tps61200 se encarga de elevar el voltaje del supercondensador a un nivel de voltaje final y regulado de 3.3V, requerido para el funcionamiento de la carga. El tps61200 es activado por la señal en alto de VBAT_OK para abastecer de energía a la carga, la cual inmediatamente pondrá en alto la señal SEN con el fin de mantener activo al tps61200 y desactivarlo una vez la carga haya cumplido su trabajo a través del optomofet LBA716, evitando así que esta dependa de la calibración de los niveles de voltaje de VBAT_OK. Una mala calibración de VBAT_OK podría tener como resultado que la carga no reciba energía el tiempo suficiente para finalizar su trabajo o por el contrario que lo termine pero continúe con un consumo innecesario.

Para obtener un adecuado funcionamiento del sistema PMS, tanto el circuito integrado bq25505 y tps61200 fueron configurados adecuadamente de la siguiente manera:

2.4.3.1 Configuración del bq25505

Rastreo del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT)

El MPPT debe ser configurado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\mathbf{VREF_SAMP} = \mathbf{VIN_DC}_{(OpenCircuit)} \left(\frac{R_{OC1}}{R_{OC1} + R_{OC2}} \right)$$

Si el punto de referencia se encuentra al 50% del voltaje en circuito abierto, el terminal VOC_SAMP debe ser conectado a tierra del circuito para su configuración. En celdas de combustible microbianas el punto de máxima potencia MPP se encuentra generalmente al 50% de su voltaje en circuito abierto por lo que en principio se utilizó el dispositivo a este porcentaje.

El bq25505 para el funcionamiento de su módulo MPPT, desactiva el conversor por alrededor de 256ms a intervalos de 16 segundos, con el fin de obtener una muestra de voltaje en circuito abierto de la fuente y almacenarlo en un condensador conectado a VREF_SAMP sin embargo, las MFCs tiene un tiempo de recuperación mayor de 256ms, adquiriéndose un voltaje en circuito abierto menor al real lo que con el tiempo, tiende a disminuir por debajo de los 100mV inhabilitando al cargador; para evitar este fenómeno, se utilizó una referencia externa de voltaje procedente de una MFC de referencia conectada mediante un potenciómetro de 1MΩ al terminal VREF_SAMP del bq25505. El potenciómetro permite ajustar el voltaje de muestra al porcentaje deseado.

Protección del dispositivo de almacenamiento contra baja tensión y sobretensión

Para evitar daños en el elemento de almacenamiento el valor de voltaje contra sobretensión debe ser programado de acuerdo a la fórmula:

$$\mathbf{VBAT_OV} = \frac{3}{2} \mathbf{VBIAS} \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right)$$

El supercondensador soporta un máximo de 2.7V por lo que un voltaje menor debe ser conseguido para asegurar su protección; el valor de VBIAS típicamente es de 1.21V acorde al datasheet. Con una resistencia R_{OV1} de $8.2M\Omega$ y una R_{OV2} de $3.3M\Omega$ se tiene:

$$\mathbf{VBAT_OV} = \frac{3}{2} 1.21V \left(1 + \frac{3.3M\Omega}{8.2M\Omega} \right) = 2.54V$$

Las resistencias deben ser conectadas al dispositivo acorde a la figura 9-2:

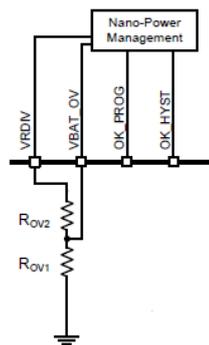


Figura 9-2: Conexión resistencias protección contra sobre voltaje
Realizado por: López, Denys; 2017.

El valor de protección contra bajo voltaje es definido internamente por el dispositivo a un nivel aproximado $\mathbf{VBAT_UV} = 1.95V$.

Niveles de voltajes adecuados de batería.

Para establecer el rango de voltajes de nivel adecuado de carga de batería, las resistencias R_{ok1} , R_{ok2} y R_{ok3} deben ser establecidos en función de los valores de voltaje $\mathbf{VBAT_OK_PROG}$ y $\mathbf{VBAT_OK_HYST}$ de acuerdo a las fórmulas:

$$\mathbf{VBAT_OK_PROG} = \mathbf{VBIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right)$$

$$\mathbf{VBAT_OK_HYST} = \mathbf{VBIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right)$$

Es recomendable que la suma de las 3 resistencias de configuración no sobrepasen los 13 MΩ, sin embargo la utilización de resistencias demasiado bajas podrían consumir más de lo debido disminuyendo la eficiencia del dispositivo. El voltaje de VBAT_OK_PROG debe ser un valor comprendido entre VBAT_UV = 1.95V y VBAT_OV = 2.54V. Para un valor de R_{OK1} de 2.2MΩ y R_{OK2} de 1.8MΩ se tiene:

$$\mathbf{VBAT_OK_PROG} = 1.21V \left(1 + \frac{1.8M\Omega}{2.2M\Omega} \right) = 2.2V$$

Se colocó una resistencia variable de 0.5MΩ en serie con R_{OK2} con el fin de obtener un rango más amplio de configuración:

$$\mathbf{VBAT_OK_PROG} = 1.21V \left(1 + \frac{1.8M\Omega + 0.5M\Omega}{2.2M\Omega} \right) = 2.475V$$

De esta manera se obtiene un rango de VBAT_OK_PROG variable de 2.2V a 2.475V que se puede configurar acorde a la demanda de carga.

Si R_{OK3} es igual a cero, el valor de VBAT_OK_HYST es igual a VBAT_OK_PROG con lo cual la señal VBAT_OK es puesta en alto inmediatamente se alcance este valor sin embargo, el tiempo que dure la misma podría ser demasiado corta para que la carga pueda poner en alto la señal SEN, que mantiene la alimentación activa por lo que, para conseguir el tiempo suficiente para activar la señal SEN, una resistencia variable de 0.3MΩ ha sido considerado como R_{OK3} el cual debe ser calibrado adecuadamente para conseguir dicho fin. Para su valor máximo se tiene:

$$\mathbf{VBAT_OK_HYST} = 1.21V \left(1 + \frac{1.8M\Omega + 0.3M\Omega}{2.2M\Omega} \right) = 2.365V$$

Las resistencias deben ser conectadas al dispositivo acorde a la figura 10-2:

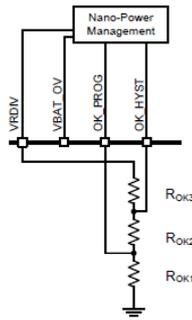


Figura 10-2: Conexión resistencias configuración OK_PROG y OK_HYST
Realizado por: López, Denys; 2017.

Debido a que la carga en ningún momento es alimentada directamente de las MFCs, sino que se espera a que el supercondensador obtenga la energía suficiente para ponerla en funcionamiento, se pueden utilizar los valores de inductores y condensadores recomendados por el fabricante: $L1 = 22 \mu\text{H}$, $\text{CBYP} = 0.01 \mu\text{F}$, $\text{CREF} = 10 \text{ nF}$ y $\text{CSTOR} = 4.7 \mu\text{F}$. Como dispositivo de almacenamiento se utilizó un supercondensador de 0.7F

2.4.3.2 Configuración del tps61200

Voltaje de salida.

El tps61200 puede ser configurado mediante resistencias externas para obtener a su salida un voltaje comprendido entre 1.8 V a 5.5 V. En el diseño de la carga el microcontrolador, módulo de radiofrecuencia y el sensor de temperatura aceptan un voltaje de 3.3V por lo que este es el voltaje de salida requerido, esto se consigue utilizando la siguiente fórmula:

$$R1 = R2x \left[\frac{VOUT}{VFB} - 1 \right]$$

El fabricante recomienda mantener el valor de R2 cercano a 200 k Ω y cuando el voltaje de salida es regulado adecuadamente el voltaje VFB típicamente es de 500mV. Reemplazando en la fórmula para una R2=180k Ω :

$$R1 = 180000\Omega x \left[\frac{3.3V}{0.5V} - 1 \right] \approx 1M\Omega$$

Las resistencias calculadas, deben ser conectadas como lo indica la figura 11-2.

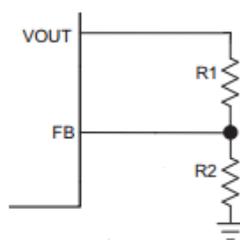


Figura 11-2: Conexión resistencias de configuración de voltaje de salida
Realizado por: López, Denys; 2017.

Debido a que la carga es ligera por debajo de los 300mA, el modo Power Save Mode debe ser activado, esto se consigue conectando el terminal PS del dispositivo a tierra. La protección por bajo voltaje de ingreso UVLO no es requerido en este sistema por lo que el terminal UVLO es conectado al terminal VIN del dispositivo. Para su funcionamiento el dispositivo requiere de un inductor, cuyo valor recomendado por el fabricante es de 1.5 μ H a 4.7 μ H por lo cual, se utilizó un inductor de 2,2 μ H en la aplicación, finalmente se requieren los condensadores de entrada C1, salida C2 y auxiliar C3, cuyos valores recomendados y a utilizarse son 10 μ F, 10F y 1 μ F respectivamente.

2.4.4 Elementos en Celdas de Combustible Microbianas

Las celdas de combustible microbianas son los dispositivos encargados de generar la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento adecuado de los dispositivos electrónicos que conforman el nodo sensor por lo que, deberán ser capaces de proveer la potencia suficiente para el funcionamiento óptimo del circuito PMS y permitir tiempos de transmisión con tiempos no muy prolongados. La potencia mínima requerida por el PMS para su correcto funcionamiento viene determinada por las características eléctricas del circuito de extracción de energía, en el caso de estudio es el circuito integrado bq25505. Los valores de interés encontrados en su datasheet se describen en la tabla 2-2.

Tabla 2-2: Parámetros de funcionamiento del circuito integrado Bq25505

Parámetro	Min	Max	Typ	Descripción
VIN(DC)	0.1 V	5.1 V	-----	voltaje de entrada en modo de operación Main Boost Charger Enabled
PIN	0.005 mW	510 mW	-----	rango de potencia de entrada en operación de carga normal
I-CHG(CBC_LIM)	-----	285 mA	230 mA	límite de corriente de entrada del cargador
VIN(CS)	-----	400 mV	330 mV	mínimo voltaje de entrada en modo de operación cold-start

PIN(CS)	-----	-----	15 μ W	mínima potencia de entrada en modo de operación cold-start
IQ	-----	400 nA	325 nA	corriente de quiescente en modo de operación FULL

Realizado por: López, Denys; 2017.

Dado que las potencias generadas por las MFCs son muy bajas, los valores tomados en cuenta son los mínimos requeridos para su funcionamiento. Las MFCs deben ser capaces de generar como mínimo estos valores:

Vo(MFCs) = Voltaje mínimo de entrada= 330 mV (cold start), 100 mV (Main Boost Charger)

Po(MFCs) = Potencia mínima de entrada= 0.015 mW

Sin embargo hay que tomar en cuenta que la eficiencia mostrada por el dispositivo para valores de potencia y voltaje demasiados bajos es pobre. Como se observa en el gráfico 7-2, si se toma en cuenta el voltaje de funcionamiento mínimo del dispositivo de 100mV, se observa que la eficiencia para una salida de 2V y 3V (línea rosada y roja) es de apenas el 30%. Una eficiencia más aceptable cercana al 75 % puede ser observada a un voltaje de entrada de 300mV y del 80% para una entrada de 500mV.

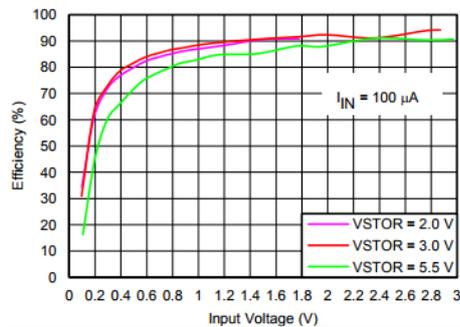


Gráfico 7-2: Eficiencia del bq25505 en función del voltaje de entrada

Fuente:(<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>)

Los valores de eficiencia anteriormente mostrados se presentan para una entrada de corriente de 100uA y como muestra el gráfico 8-2, la eficiencia también depende de la corriente de funcionamiento.

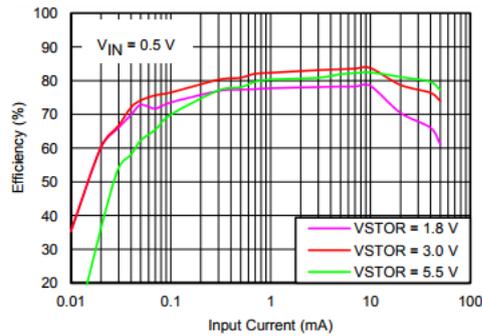


Gráfico 8-2: Eficiencia del bq25505 en función de la corriente de entrada
Fuente: (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>)

Para obtener un adecuado funcionamiento del dispositivo asociado a una aceptable eficiencia cercana al 70 %, se tomaron en cuenta los siguientes valores, que las MFCs deberán ser capaces de generar los valores de voltaje, corriente y potencia mostrados en la tabla 3-2.

Tabla 3-2: Valores de funcionamiento mínimos para una eficiencia cercana al 70%

Voltaje MFCs	Corriente MFCs	Potencia MFCs
250 mV	0,1 mA	0,025 mW

Realizado por: López, Denys; 2017.

2.4.4.1 Construcción de Celdas de Combustible Microbianas Sedimentarias

Se construyeron celdas de combustible microbianas sedimentarias (SMFCs) de laboratorio, las cuales permiten obtener una idea a priori del comportamiento y potencial del sedimento procedente de un río, laguna o mar, para la generación de electricidad, para posteriormente poder crear aplicaciones de campo como instalación de sensores meteorológicos en estos medios. La figura 12-2 muestra la SMFC de laboratorio que se implementó, cuyos ánodos y cátodos están contruidos con tela de fibra de carbono, con dimensiones de 100x100 mm para el electrodo ánodo y de 100x150mm para el cátodo.

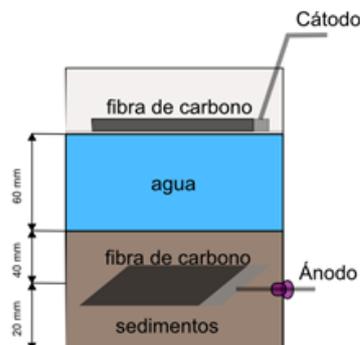


Figura 12-2: Celda de combustible microbiana sedimentar
Realizado por: López, Denys; 2017.

Para la sujeción de los electrodos se utilizó tiras de malla de acero inoxidable de 100x20 mm conectado a un alambre de aleación níquel/titanio de 100 mm de longitud (gráfico 9-2) y como sustrato se utilizó sedimentos obtenidos de la laguna de Colta ubicada en la provincia de Chimborazo cantón Colta con coordenadas -1.725873, -78.757530 (gráfico 10-2); además de muestras de agua de la misma.

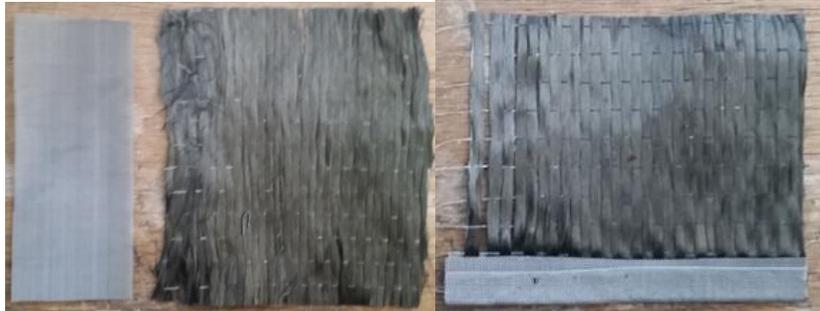


Gráfico 9-2: Fibra de carbono y malla de acero inoxidable para electrodos
Realizado por: López, Denys; 2017.



Gráfico 10-2: Laguna de Colta
Realizado por: López, Denys; 2017.

Para la construcción de las SMFC se utilizó un envase cilíndrico plástico con un radio de 145 y altura de 200 milímetros en el cual, el electrodo ánodo fue enterrado a una profundidad de 40 mm en una capa de sedimento de 60 mm de espesor, cuyo alambre de titanio fue sacado hacia el exterior a través de un corcho a un costado del envase. Sobre la capa de sedimento se vertió 60mm de agua procedente de la laguna y sobre su superficie se colocó papel celofán como soporte para el electrodo cátodo (gráfico 11-2).



Gráfico 11-2: SMFC construida vista superior y lateral
Realizado por: López, Denys; 2017.

2.4.5 Elementos de la Estación Base

La estación base es el sistema responsable de recibir, procesar, almacenar y presentar los datos recibidos del nodo sensor, por lo que deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

- Recibir la información proveniente del nodo sensor a través del receptor de radiofrecuencia Gateway.
- Decodificar y procesar la información correctamente.
- Almacenar los datos resultantes en una base de datos.
- Permitir la ejecución de alguna aplicación para la presentación y consulta de datos.
- Facilidad de implementación y ahorro de recursos.

El gráfico 12-2 muestra el diagrama en bloques de la estación base propuesta para cumplir con los requerimientos establecidos, compuesta de un módulo de radiofrecuencia XBEE ZB S2C TH encargado de recibir la información proveniente del nodo sensor el cual, trabaja conjuntamente con un Mini Pc UDOO NEO comunicándose a través de sus interfaces UART; la información recibida es almacenada en una base de datos y presentada en una página html. Con la utilización del módulo XBEE ZB S2C TH se mantiene la compatibilidad con el nodo sensor mientras que el mini Pc UDOO satisface las necesidades de procesamiento y recursos a un costo conveniente.

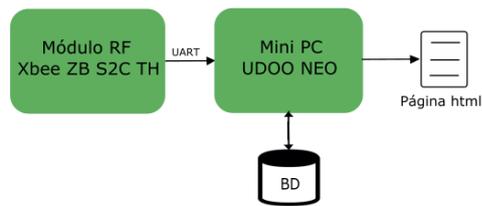


Gráfico 12-2: Diagrama de bloques estación base
 Realizado por: López, Denys; 2017.

Establecidos los requerimientos de la estación base, se establecerán los elementos que lo conforman.

2.4.5.1 Mini PC UDOO NEO

Mini Pc de placa reducida, bajo costo y consumo, equipado con un procesador de aplicaciones NXP® i.MX 6SoloX con un núcleo ARM Cortex-A9 embebido y un núcleo Cortex-M4, capaz de soportar Android Lollipop y/o UDOObuntu 2. El núcleo Cortex-M4 permite la integración de Arduino al sistema así como el soporte de sus respectivos shields.



Figura 13-2: (UDOO NEO EXTENDED EDITION)
 Fuente: (<https://www.udoo.org/docs-neo/Introduction/Introduction.html>)

Características destacables UDOO NEO EXTENDED EDITION

- Procesador NXP® i.MX 6SoloX con 512MB de RAM.
- 1x USB 2.0 , 1x USB OTG
- Conectividad Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0 de bajo consumo.
- 3x UART, 2x CAN bus, 8x PWM, 3x I2C, 1x SPI.
- Acelerómetro, magnetómetro y giroscopio digital de tres ejes.
- Arduino compatible con los terminales y shields de Arduino estándar.
- 32 GPIOs (A9 dedicado), 22 Arduino GPIOs (M4 dedicado).
- Soporte para Android Lollipop y Linux UDOObuntu2 (14.04 LTS)

2.5 Esquemas de conexiones del equipo

A continuación se presentan los diagramas de conexiones de los dispositivos electrónicos que conforman el nodo sensor, la estación base y las celdas de combustible microbianas.

2.5.1 Diagrama de conexiones de la carga

El gráfico 13-2 muestra el esquema electrónico de la carga, donde:

-**VCC.**- es la alimentación del sistema la cual es tomada del sistema PMS a un voltaje fijo de 3.3V.

-**SEN.**- es una señal de salida del microcontrolador que permite mantener y desconectar la alimentación a la carga del sistema PMS, una vez realizada la tarea de adquisición y transmisión del dato de temperatura.

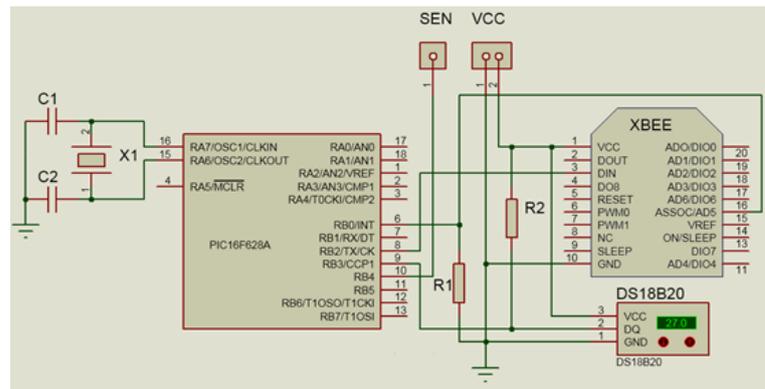


Gráfico 13-2: Diagrama electrónico de la carga
Realizado por: López, Denys; 2017.

La tabla 4-2 muestra los componentes que conforman la carga, sus valores, así como una descripción de sus conexiones.

Tabla 4-2: Valores y conexiones de dispositivos electrónicos del circuito de la carga

Dispositivo	Valor	Descripción y Conexiones
PIC	16f628a	El microcontrolador recibe su alimentación de VCC (no mostrado) y la función del terminal MASTER-CLEAR ha sido desactivada
C1	20 pF	Condensador de estabilización, conectado al terminal 2 del cristal oscilador
C2	20 pF	Condensador de estabilización, conectado al terminal 1 del cristal oscilador
X1	4 MHz	Oscilador conectado a los terminales de entrada del oscilador A7 y A6 del microcontrolador
R1	10 KΩ	Resistencia pull-off del terminal indicador de asociación

		AD5, conectado al terminal negativo de VCC y al terminal AD5 del XBEE
R2	4.7 K Ω	Resistencia pull-off requerido por dispositivos 1 wire, conectado al positivo de la alimentación y a la salida del sensor de temperatura DS18B20
Sensor	DS18B20	Sensor de temperatura digital con protocolo 1 Wire, su salida se conecta al terminal de entrada digital B3 del microcontrolador. Se alimenta de la entrada VCC
XBEE	XBee ZB S2C TH	Módulo de radiofrecuencia que recibe su alimentación de VCC en sus terminales VCC Y GND. La señal de salida del terminal de asociación AD5, ingresa al terminal de interrupción RB0 del microcontrolador. El terminal de recepción del módulo UART DIN, se conecta al terminal de salida TX del microcontrolador

Realizado por: López, Denys; 2017.

2.5.1.1 Tabla de consumos de la carga

La tabla 5-2 muestra el consumo aproximado de los dispositivos que conforman la carga acorde a sus datasheets, siendo el módulo Xbee el que posee un importante consumo de energía debiendo asegurarse tiempos de transmisión lo más cortos posibles.

Tabla 5-2: Consumo de potencia de dispositivos que conforman la carga

Dispositivo	Corriente de consumo	Potencia consumida
Xbee modo transmisión	33 mA	108,9 mW
PIC 16f628a modo operación a 4MHZ 3.3V	600 μ A	1,98 mW
Sensor ds18b20	1 mA	3,3 mW
Resistencias	1,03 mA	3,4 mW
TOTAL	35,63 mA	117,58 mW

Realizado por: López, Denys; 2017.

2.5.2 Diagrama de conexiones del PMS

El gráfico 14-2 muestra el esquema electrónico del PMS, donde:

-VIN_PMS.- entrada de conexión de las celdas de combustible microbianas.

-VOUT_PMS.- salida de voltaje hacia la carga de 3.3V.

-EN.- señal de entrada para mantener activa la salida de voltaje.

El potenciómetro de la MFC de referencia debe ser conectado en paralelo con el condensador CREF; para el funcionamiento del sistema, las referencias de los circuitos bq25505 y tps61200 están conectadas.

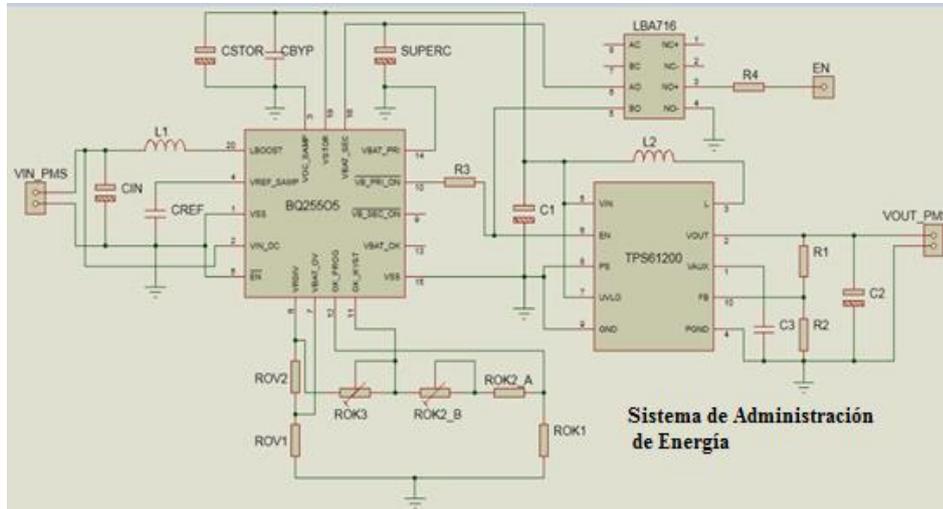


Gráfico 14-2: Diagrama electrónico del PMS
Realizado por: López, Denys; 2017.

La tabla 6-2 muestra los componentes que conforman el PMS, sus valores, así como una descripción de sus conexiones.

Tabla 6-2: Valores dispositivos electrónicos y conexiones del sistema de administración de energía

Dispositivo	Valor	Descripción y Conexiones
BQ25505	-	El BQ25505 recibe su alimentación de las MFCs, a través de la entrada VIN_PMS, y cuya salida VSTOR se conecta al terminal de alimentación VIN del TPS61200
TPS61200	-	El TPS61200 recibe su alimentación del terminal de salida VSTOR del BQ25505, y entrega en su terminal de salida VOUT un voltaje regulado de 3.3V, siempre y cuando su terminal de activación EN se encuentre en un nivel alto
LBA716	-	Este optomóseto activa el convertor TPS61200, dando una referencia de voltaje igual al voltaje del supercondensador, mediante su terminal B0, al terminal de activación EN del convertor; siempre y cuando la entrada EN se encuentre en alto.
R1	1 MΩ	Resistencia de configuración de voltaje de salida del TPS61200, que conectado en serie con R1, dan una referencia del voltaje de salida VOUT, al terminal FB del integrado, para una salida de 3.3 V
R2	180 KΩ	Resistencia de configuración de voltaje de salida del TPS61200, que conectado en serie con R2, dan una referencia del voltaje de salida VOUT, al terminal FB del integrado, para una salida de 3.3 V
R3	100 Ω	Resistencia limitadora de corriente, conectada al terminal indicador de carga adecuada del supercondensador $\overline{VB_PRI_ON}$ del BQ25505, y a la señal de activación EN del TPS61200.
R4	10 KΩ	Resistencia limitadora de corriente, conectada al terminal EN y al terminal A0, positivo del diodo emisor del Optomóseto LBA716, con el fin de activar el convertor TPS61200.
ROV1	8.2MΩ	Resistencia de configuración de protección contra sobretensión en el BQ25505, conectado en serie con ROV2 y el negativo de la fuente.
ROV2	3.3MΩ	Resistencia de configuración de protección contra sobretensión en el

		BQ25505, conectado en serie con ROV1 con el fin de ofrecer una referencia de voltaje del terminal VRDIV al terminal VBAT_OV del BQ25505.
ROK1	2.2MΩ	Resistencia que conectada en serie con ROK2_A y ROK2_B, dan una referencia de voltaje de configuración para la desactivación de la señal VBAT_OK.
ROK2_A	1.8MΩ	Resistencia que conectada en serie con ROK1 y ROK2_B, dan una referencia de voltaje de configuración para la desactivación de la señal VBAT_OK.
ROK2_B	0.5MΩ	Resistencia variable que permite variar el nivel al cual se desactiva la señal de salida VBAT_OK, conectada en serie con ROK1 y ROK2_A, dan un voltaje de referencia de VRDIV al terminal OK_PROG del BQ25505
ROK3	0.3MΩ	Resistencia variable que conectada a los terminales VRDIV y OK_HYST del BQ25505, permite variar el nivel al cual se activa la señal de salida VBAT_OK.
C1	10 uF	Condensador de entrada del TPS61200, conectado entre la entrada VIN y el negativo de la alimentación.
C2	10 uF	Condensador de salida del TPS61200, conectado entre la salida VOUT y el negativo de la alimentación.
C3	1 uF	Condensador de alimentación de los circuitos de control del TPS61200, conectado al terminal VAUX del mismo y al negativo de la fuente.
CIN	4.7 uF	Condensador de entrada del BQ25505, conectado entre la entrada VIN_DC y el negativo de la alimentación.
CREF	0.01 uF	Condensador que almacena una referencia del voltaje en circuito abierto del dispositivo de alimentación, conectado entre el terminal VREF_SAMP del BQ25505 y el negativo de la alimentación.
CSTOR	4.7 uF	Condensador de salida del BQ25505, conectado entre el terminal VSTOR del mismo y el negativo de la alimentación.
CBYP	0.01 uF	Condensador requerido para filtrar señales de alta frecuencia, conectado entre el terminal VSTOR del BQ25505 y el negativo de la alimentación.
SUPERC	0,7 F	Supercondensador de almacenamiento de la energía extraída de las MFCs, conectado al terminal de entrada VBAT_SEC del BQ25505, y el negativo de la alimentación.
L1	22 uH	Bobina de carga y descarga del integrado BQ25505, conectada entre los terminales VIN_DC y LBOOST del mismo.
L2	2.2 uH	Bobina de carga y descarga del integrado TPS61200, conectada entre los terminales VIN y L del mismo.

Realizado por: López, Denys; 2017.

2.5.3 Diagrama de conexiones de la estación base

Las conexiones físicas pueden ser observadas en el gráfico 15-2 donde:

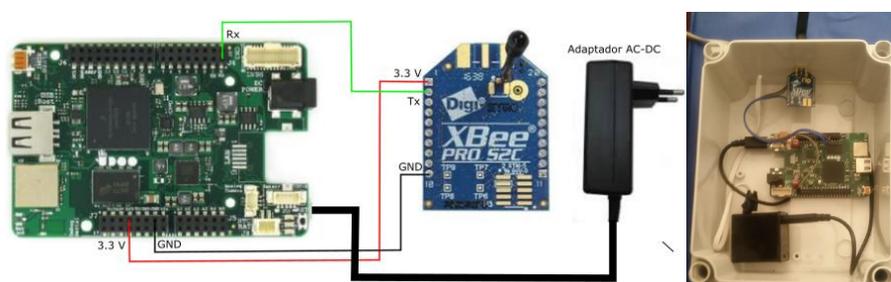


Gráfico 15-2: Diagrama de conexiones Estación Base

Realizado por: López, Denys; 2017.

-La alimentación de la placa UD00 NEO es provista por un adaptador AC-DC de 5V a 2A.

-El módulo Xbee es alimentado mediante los terminales 3.3V y GND del ARDUINO integrado en la placa UDOO.

-La comunicación entre dispositivos se lo realiza a través de sus interfaces UART Rx y Tx.

2.5.4 Conexión de celdas de combustible microbianas sedimentarias

Se construyeron cinco SMFCs de las cuales, cuatro fueron conectados en paralelo con el fin de aumentar la potencia entregada por las mismas, como se observa en el gráfico 16-2. La SMFC restante fue utilizada para, mediante una resistencia variable, obtener una referencia de voltaje para conectarla al terminal del módulo de adaptación de impedancia MPPT del bq25505.

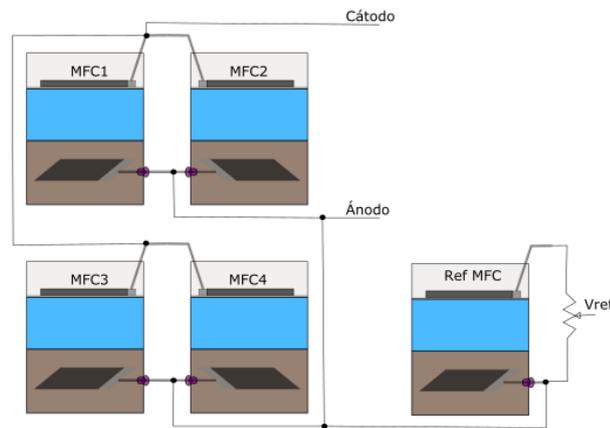


Gráfico 16-2: Conexión en paralelo SMFCs
Realizado por: López, Denys; 2017.

2.6 Requerimientos de software del sistema

El software requerido por el equipo de monitoreo, cubre tareas como programación, configuración y diseño de los sistemas los cuales, deberán cubrir los siguientes requerimientos:

2.6.1 Requerimientos de software del nodo sensor

-Adquirir una lectura de temperatura del sensor ds18b20 mediante protocolo 1Wire.

-Enviar el dato de temperatura y un id de identificación de nodo, codificado en formato JSON hacia la estación base, mediante el módulo de radiofrecuencia.

-Minimizar el consumo energético de la carga, para evitar tiempos prolongados de transmisión.

2.6.2 *Requerimientos de software para la estación base*

-Receptar la información proveniente del nodo sensor en formato JSON, mediante la utilización del módulo de radiofrecuencia Xbee conectado al Arduino embebido en la mini pc UDOO, y procesarlo mediante una aplicación en el host.

-Decodificar las cadenas JSON, con el fin de almacenar la variables extraídas en una base de datos con campos id, nodo, temperatura y tiempo.

-Visualizar mediante tablas y gráficos, en una aplicación web, la información almacena en la base de datos así como permitir descargarlos.

2.6.3 *Concepción general de la arquitectura de software del sistema*

El gráfico 17-1, muestra el diagrama de comunicaciones de elementos que conforman el nodo sensor donde, un microcontrolador de la familia PIC es programado en lenguaje C mediante el compilador Pic C Compiler, con el fin de comunicarse con el sensor de temperatura y el módulo de radiofrecuencia, para realizar las tareas de adquisición, codificación y envío de la información en formato JSON. El módulo XBEE no admite líneas de programación, pero debe ser cargado y configurado con el firmware correcto mediante el software XCTU.

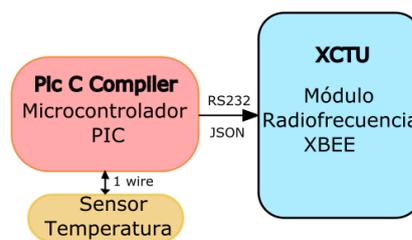


Gráfico 17-2: Diagrama de software del nodo sensor
Realizado por: López, Denys; 2017.

El gráfico 18-2, muestra el diagrama de comunicaciones de software entre aplicaciones de la estación base; la información en formato JSON proveniente del nodo sensor, es enviada desde el módulo Xbee hacia el Arduino a través de sus interfaces UART la cual, es recogida a través del objeto “Serial0” en el sketch de Arduino y reenviada directamente hacia el objeto “Serial” sin realizar ningún cambio. El reenvío de la información entre los objetos de puertos seriales

“Serial0” y “Serial”, permite que Arduino, que corre bajo el núcleo Cortex-M4, tenga comunicación con el núcleo Cortex-A9 que corre el sistema operativo de UDOO NEO.

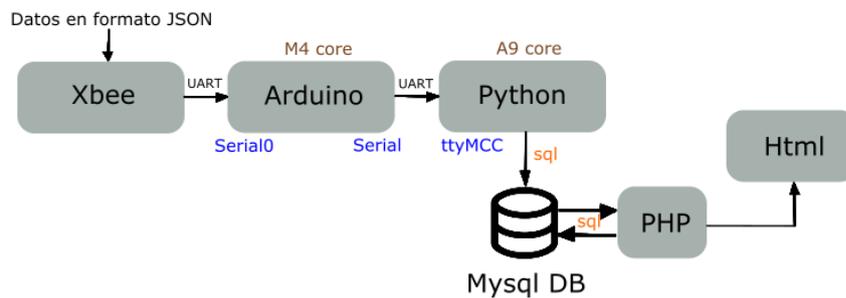


Gráfico 18-2: Diagrama de software de la estación base
Realizado por: López, Denys; 2017.

La información enviada por Arduino puede ser recibida por cualquier aplicación que corra bajo el Sistema Operativo (Cortex-A9) y accesible por software por el puerto serial ttyMCC; la aplicación encargada de esta tarea es un script escrito en Python, debido a ser un lenguaje potente, de fácil uso, ampliamente extendido, además de venir ya preinstalado en el sistema. El script permite recibir la información en formato JSON, decodificarla y almacenar los datos extraídos en una base de datos en Mysql, para poder ser consultados a través de una página html servida por Apache y con PHP como lenguaje de programación del lado del servidor y Javascript del lado del cliente.

2.6.4 Software para la configuración del sistema

El conjunto de software utilizado para configurar y programar los sistemas, tanto para los elementos del nodo sensor como de la estación base, son los siguientes:

2.6.4.1 Software para la configuración de módulos XBEE

Para la configuración de los módulos de radiofrecuencia XBEE, se utilizó el software XCTU el cual, es un software para la configuración y entorno de análisis de módulos de radiofrecuencia Xbee, multiplataforma con interfaz gráfica, intuitiva y de fácil uso que ofrece tareas como: configuración de módulos red o actualización de firmware, generador de tramas, consola serial, prueba de rango de alcance, etc.

La versión 6.3.8, fue la utilizada para cargar el firmware y aplicar las configuraciones de los modulos XBee ZB S2C TH. Las configuraciones tanto para el nodo sensor como para la estación base que permitan establecer una comunicación punto a punto en modo transparente, se

muestran en la tabla 7-2. Estas configuraciones permiten a los dispositivos comunicarse por el mismo canal (CH=C), bajo la misma red (ID=2017) y ambos dispositivos configurados como dispositivos finales (CE=0) al no existir entre ellos una relación maestro/esclavo.

Tabla 7-2: Parámetros de Xbee del nodo sensor y estación base

Parámetro	Descripción	Valor
CH	Canal	C
ID	PAN ID	2017
DH	Dirección de destino high	e.b 0013A200/ n.s 0013A200
DL	Dirección de destino low	e.b 32HHD67A/ n.s 40DDD77A
CE	Habilitar como coordinador	0
A1	Asociación dispositivo final	0

Realizado por: López, Denys; 2017.

Para mas informacion y ayuda en el manejo de los modulos Xbee y de su software de configuración,referrirse a los siguientes enlaces:

<https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/PDFs/90000976.pdf>

<https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf>

2.6.4.2 Software para la programación del microcontrolador pic 16f628A

La familia de microcontroladores PIC, requieren de un software para su programación, configuración y carga de archivo de programa los cuales, pueden ser programados directamente en lenguaje ensamblador o en un lenguaje de alto nivel como Basic o C. El Compilador CCS C permite programar la familia de microcontroladores PIC en lenguaje C, de fácil uso y fácil de aprender, con librerías optimizadas para el manejo de recursos internos (timers, interrupciones, usart, etc) y comunicación con dispositivos externos (lcd , memorias, RTC, etc) además de ofrecer depuración y corrección de código. Para la carga del programa se utilizó el software PICKit el cual, es un entorno de desarrollo que permite la programación y depuración de la familia de microcontroladores Pic de 8, 16 y 32 bits, así como algunas memorias tipo serial EEprom de Microchip.

La versión 5.007 del Compilador CCS C fue la utilizada para la compilación y desarrollo del programa del microcontrolador 16f628a, mientras que para la carga de programa se lo realizó mediante la versión 2.61 de PICKit 2.

2.6.4.3 Software para la programación de Arduino

Las placas de desarrollo Arduino cuentan con su propio IDE, escrito en Java basado en Processing y otras tecnologías el cual, permite escribir programas, depurarlos y subirlos a las diferentes versiones de placas Arduino, con soporte para Linux, Windows y Mac, además de ofrecer un editor web. La versión 1.8.4 fue la utilizada en la programación del Arduino embebido en la mini computadora UDOO, cuyo sistema operativo ya cuenta con esta versión instalada por defecto.

2.6.4.4 Software para el desarrollo de la aplicación web

Para la ejecución de la aplicación web se utilizó LAMP el cual, es un conjunto de tecnologías software que ofrecen una infraestructura de servidor web, popular y ampliamente utilizado, cuya popularidad se debe a su bajo costo, flexibilidad y rendimiento que a pesar de nombrárselos como un conjunto, originalmente no fueron desarrollados para trabajar como tal. Consta de los siguientes componentes:

- GNU/Linux.- sistema operativo anfitrión
- Apache.- servidor http de código abierto
- Mysql.- sistema de gestión de base de datos tipo relacional
- Php.- lenguaje de programación de lado del servidor

Las versiones de software utilizadas fueron: sistema operativo UDOObuntu 2.2.0, Apache 2.2.34, Mysql 5.7 y Php 5.6.30. Además, se instaló phpMyAdmin 4.0.10.20 el cual, es software que permite crear y administrar bases de datos de una manera mucho más amigable a través de una interface gráfica de usuario (GUI), que corre en una aplicación web.

Los lenguajes de programación, marcado y de estilos, utilizados fueron: JavaScript para la programación del lado del cliente, Php para el lado del servidor, Html y CSS para el marcado y los estilos por lo cual, para el desarrollo del código, se utilizó el software Sublime Text 2 Build 3056 que es un entorno de programación para la edición de código fuente, desarrollado en C++ y Python para las librerías; soporta nativamente 43 lenguajes de programación y marcado populares como Python, Javascript, Php, Java, html, sql, entre otros; con soporte para MAC, Linux y Windows. Posee características interesantes como auto complemento de código, marcado de llaves, configuración de keybindings, soporte de plugins para extender su funcionalidad, colores específicos para cada lenguaje para facilitar la lectura, etc.

2.6.4.5 Software para la programación del host de la estación base

Las minicomputadoras UDOO tienen instaladas por defecto Python 2.7.5 en sus sistemas operativos y lo recomiendan como lenguaje de programación para el desarrollo de aplicaciones de propósito general razón por la cual, fue elegido para la programación del host de la estación base. Python es un lenguaje de programación interpretado, de alto nivel y de propósito general, con soporte para paradigmas de programación como: orientada a objetos, imperativa, funcional y procedural, además de ser de código abierto y multiplataforma que enfatiza la legibilidad y orden del código, delimitándolos mediante tabulación y ejecutando tareas con pocas instrucciones potentes. Debido a su popularidad, Python ofrece una gran variedad de paquetes de software para aplicaciones en campos como: inteligencia artificial, robótica, estadística, simulación, visión artificial, base de datos, redes y programación web, servidores, algebra lineal, etc, accesibles desde la web.

Para la escritura del código se utilizó IDLE 2.7.5 el cual, es un entorno de aprendizaje y desarrollo integrado para Python, escrito 100% en Python, y con soporte para MAC, Unix y Windows. Está compuesto de una ventana intérprete de comandos (shell), con colores para código de entrada, salida y mensajes de error; y de un editor de texto que facilita la escritura mediante características como indentación inteligente, auto complementación de código, llamadas, etc.

2.6.4.6 Software utilizado para el envío de datos del nodo sensor

Los datos enviados desde el o los nodos sensores, deben seguir algún formato bien definido de intercambio de datos, con el fin de que la estación base pueda recibirlos e interpretarlos correctamente; estas reglas pueden ser definidas por el desarrollador o utilizar un formato ya conocido. Se utilizó JSON por ser un formato de intercambio de datos ligero basado en la notación del lenguaje de programación Javascript, fácil de leer y escribir para un ser humano así como fácil de generar y decodificar para las computadoras. Es independiente del lenguaje de programación y soportado por una gran cantidad de lenguajes como: C++, C, C#, JavaScript, Java, Perl, Python, etc, lo que lo hace ideal para el intercambio de datos entre distintos lenguajes de programación. Mediante JSON se pueden compartir datos de tipo numérico, arreglos, booleanos, nulos, arreglos y objetos. La estructura más sencilla es la de pares de nombres/valores cuya sintaxis es similar al de declarar variables en Javascript. Lo que se requiere en nuestro sistema, es que el nodo sensor tenga la capacidad de enviar un ID de identificación y un dato de temperatura hacia la estación base; la hora y fecha de adquisición

serán añadidas en la programación del host debido a la incapacidad de integrar un reloj en tiempo real en el nodo. La codificación en JSON es de la siguiente manera:

```
{"Id": "1", "T1": "22.1"}
```

Donde:

- Id: es la variable de identificación de nodo.
- T1: es la variable de identificación del sensor.

La sintaxis, formación de estructuras más complejas, lenguajes soportados, etc, pueden ser encontradas en la página oficial: <http://www.json.org/>

2.6.5 Lógicas de programación del equipo

Los equipos con capacidades computacionales, tanto del nodo sensor como de la estación base, siguen las siguientes lógicas de programación:

2.6.5.1 Diagrama de flujo de la programación del microcontrolador 16f628a

El programa cargado en el microcontrolador sigue el diagrama de bloques mostrado en el gráfico 19-2 donde:

1.- Se configuran directivas de preprocesador de configuración, para desactivar módulos innecesarios, establecer la frecuencia de programa, configurar módulo UART a 9600 bits/s con 8 bits de datos.

2.- Se configuran:

- Interrupción externa RB0 por flanco de subida
- Watchdog timer con un tiempo de desbordamiento a 2.3 segundos
- Establece entrada y salidas del microcontrolador
- Se establece la salida de control SEN a nivel alto para mantener la alimentación del circuito

3.- El microcontrolador entra en modo SLEEP el cual, será despertado por la interrupción externa y en caso de no darse en un lapso de 2.3 segundos será reseteado por el Watchdog timer

4.-Se desactiva las interrupciones, se realiza una lectura de temperatura para después enviarla a través del módulo UART, el formato JSON es establecido manualmente, donde para poder colocar comillas en un String, se debe colocar un signo de barra invertida antes de las mismas:

```
printf ("{ \"id\" : \"1\" , \"t1\" : \"%3.1f\" }",TEMP);
```

5.- Se establece la salida de control SEN a nivel bajo para desconectar la alimentación del circuito.

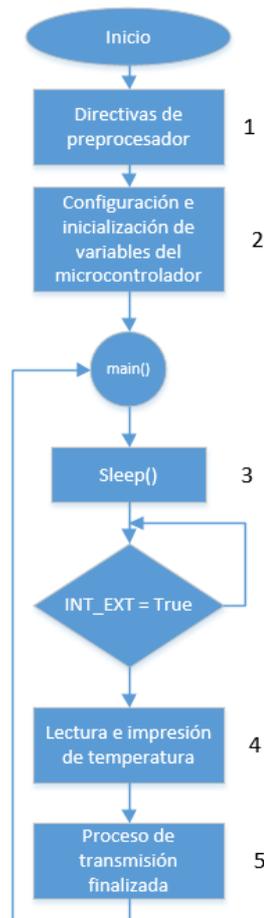


Gráfico 19-2: Diagrama de flujo programa microcontrolador PIC
Realizado por: López, Denys; 2017.

Debido a la simplicidad de la programación, no se definieron funciones propias. Las bibliotecas que se utilizaron para la programación del microcontrolador fueron:

ds1820.c.- biblioteca que permite el manejo del sensor de temperatura ds18b20, para la lectura de temperaturas con una resolución de 0.1 grados; internamente utiliza la biblioteca 1wire.c para la comunicación entre dispositivos.

2.6.5.2 Diagrama de flujo de la programación de Arduino

El diagrama de flujo del gráfico 20-2 muestra la lógica de programación del sketch de Arduino, cuyo principal objetivo es el de servir como puente de comunicación entre el módulo de radiofrecuencia Xbee y el núcleo ARM Cortex-A9 de UDOO NEO. El procesador Cortex-M4 que ejecuta el Sketch de Arduino, dispone de dos interfaces UART accesibles por software mediante los objetos “Serial” y “Serial0”; el objeto “Serial0” permite la comunicación con un dispositivo externo (modulo Xbee) a través de los terminales de comunicación 0 (TR) y 1(TX), mientras que el objeto “Serial” otorga un camino de comunicación entre los procesadores M4 y A9 internamente conectados. El diagrama de flujo sigue la siguiente lógica:

1.- Creación e inicialización de variables

2.- Configuración de los puertos Serial y Serial0 a una velocidad de 9600bps

3.- Bucle infinito donde se evalúa el buffer de entrada del puerto Serial0 en busca de nuevos caracteres entrantes con la ayuda del método available() de Arduino.

4.- En caso de existir un nuevo carácter entrante, el programa utiliza el método readStringUntil() de Arduino el cual, permite leer todos los caracteres entrantes hasta encontrar un salto de línea.

5.- Almacena los datos leídos en una variable de tipo String, que es enviada hacia el puerto Serial con el método println() de Arduino.

6.- En el caso de no existir ningún carácter entrante, el programa espera un tiempo de 10ms antes de evaluar nuevamente el buffer.

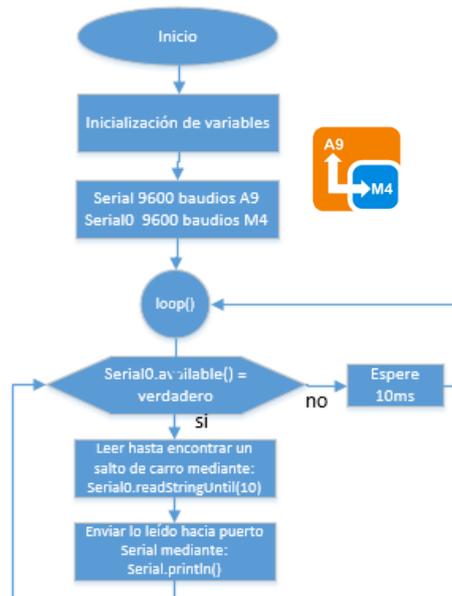


Gráfico 20-2: Diagrama de flujo Sketch de Arduino
Realizado por: López, Denys; 2017.

Debido a la simplicidad de la programación, no se definieron métodos propios y no se requirió de librerías adicionales.

2.6.5.3 Diagrama UML de la base de datos

La base de datos fue implementada en Mysql la cual consta de los siguientes campos:

-id: variable de tipo INT y con autoincremento; es el identificador y clave primaria.

-nodo: variable de tipo VARCHAR que identifica el nombre de nodo sensor de donde provienen los datos.

-temperatura: variable de tipo VARCHAR que almacena la temperatura adquirida por el nodo sensor.

-tiempo: variable de tipo TIMESTAMP que proporciona la fecha y hora a la cual se ha almacenado la información.

El gráfico 21-2 muestra el diagrama UML de la base de datos la cual, consta de una única tabla denominada sensores.

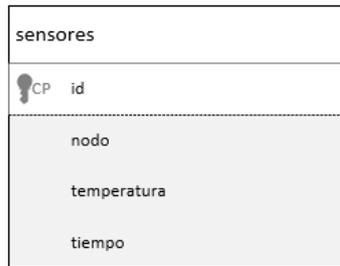


Gráfico 21-2: Diagrama UML de la base de datos
Realizado por: López, Denys; 2017.

2.6.5.4 Diagrama de flujo de la programación del Script en Python

El gráfico 22-2 muestra la lógica de programación del Script en Python, que cumple con el propósito de recibir la información enviada por Arduino a través del puerto ttyMCC del sistema operativo, decodificarla de formato JSON a variables de programa, para finalmente almacenarlas en una base de datos. El diagrama de flujo sigue la siguiente lógica:

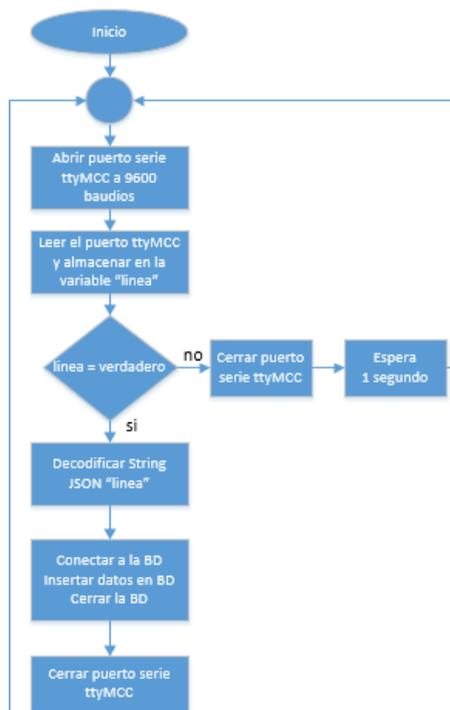


Gráfico 22-2: Diagrama de flujo Script Python
Realizado por: López, Denys; 2017.

1.- Abre el puerto serial ttyMCC a una velocidad de 9600, para permitir la comunicación con Arduino.

2.-Se lee y almacena, en la variable tipo String “linea”, la información del buffer de entrada del puerto serial ttyMCC.

3.-Se evalúa la variable “línea” que, en el caso de no poseer ningún tipo de información, cierra el puerto serial ttyMCC, espera 1 segundo, y regresa nuevamente al paso uno para observar si existe nueva información disponible en el buffer del puerto.

4.- En el caso de existir información en la variable “línea”, se procede a decodificar la variable que se encuentra en formato JSON a un objeto que permite, acceder al id del nodo sensor y al dato de temperatura.

5.- Se realiza la conexión de la base de datos con las credenciales: host = localhost, usuario = denys, password = 245663 y base = base1. Si la conexión fue exitosa, se crea la sentencia sql que permite insertar en la base, el dato de temperatura, fecha y hora de adquisición (obtenida del host), y el id del nodo sensor. Finalmente, se cierra la conexión con la base de datos.

6.- Se cierra la conexión con el puerto serial ttyMCC, para regresar nuevamente al paso uno para observar si existe nueva información disponible en el buffer del puerto.

Los módulos de Python utilizados en la programación del host de la estación base fueron:

-serial.- permite gestionar el puerto serial ttyMCC, para la comunicación entre Arduino y Python.

-time.- mediante los métodos de este módulo, es posible acceder a la fecha y hora del sistema, para poder almacenarla en la base de datos con la información procedente de la estación base.

-threading.- permite crear y gestionar hilos de programación; el script de Python corre bajo un hilo para mejorar el rendimiento del sistema.

-json.- posee métodos para la codificación y decodificación de información en formato JSON; la información que se decodifica es almacenada en un objeto.

-MySQLdb.- permite realizar las tareas de gestión de base de datos Mysql. No viene instalada por defecto y debe ser descargada e instalada de la web: <http://mysql-python.sourceforge.net/MySQLdb.html>

Para facilitar la legibilidad y manejo de programación, se declararon las siguientes clases:

- GestorPuertoSerial.- clase para el manejo del puerto serial ttyMCC, contiene los métodos:
 - `__init__(self)` .- constructor de la clase, donde se configura e inicializa el puerto serial ttyMCC a 9600 bps. No devuelve ningún parámetro de salida.
 - `leerPuerto(self)`.- método para la lectura del puerto ttyMCC, devuelve como parámetro de salida el String leído del buffer del puerto.
 - `cerrarPuerto(self)`.- cierra la conexión con el puerto ttyMCC.

- GestorBaseDatos.- clase utilizada para la gestión de la base de datos a través de los métodos:
 - `conectarBD(self)`.- método que al ser invocado conecta la base de datos con las credenciales de usuario.
 - `insertarBD(self, mensaje)`.- método que recibe como parámetro de entrada, el mensaje leído del puerto serial para decodificarlo, con el fin de crear la sentencia sql para insertar en la base de datos, el dato de temperatura, fecha y hora de adquisición (obtenida del host), y el id del nodo sensor.
 - `cerrarBD(self)`.- cierra la conexión con la base de datos.

2.6.5.5 Diagrama de flujo de la programación de la aplicación Web

La aplicación web se encarga de mostrar los datos acorde al rango de fecha escogido por el usuario a través de una tabla html y una gráfica; además de disponer un botón que permita descargar los datos en un archivo de texto plano. Para realizar estas tareas, la aplicación cuenta de dos archivos: `index.html` y `base.php`. El archivo `index.html` permite desplegar dos formularios de tipo “date” que permiten al usuario seleccionar la fecha superior e inferior, que una vez seleccionadas, serán enviadas hacia el servidor por un método tipo POST y atendido por el archivo `base.php`, al presionar un botón de tipo submit “Enviar”.

El archivo `base.php`, dispone de un script escrito en php, para la programación del lado del servidor, cuyo objetivo es recibir las fechas enviadas por el archivo `index.html` con las cuales, realiza la consulta de la base de datos y, almacenar la información en una tabla html. El gráfico 23-2 muestra la lógica de programación del script de php.

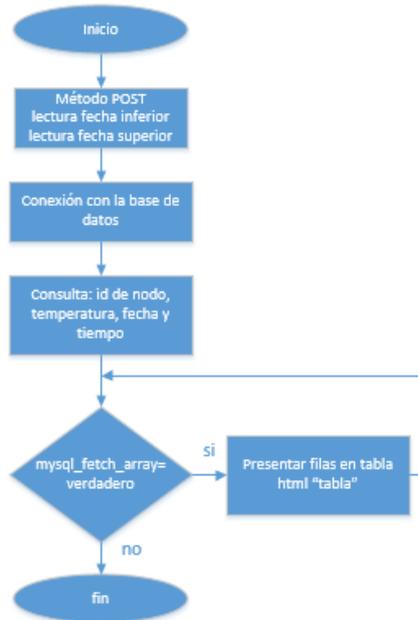


Gráfico 23-2: Diagrama de flujo aplicación web
Realizado por: López, Denys; 2017.

1.-Recibe las fechas superior e inferior por el método tipo POST, enviadas de los formularios del archivo index.html, y las almacena en variables locales.

2.-Realiza la conexión a la base de datos.

3.-Se crea la sentencia sql, para la consulta de los campos nodo, temperatura y tiempo, acorde a las fechas inferior y superior.

4.- Las filas consultadas, son presentadas en una tabla html.

No se requirió de librerías ni funciones especiales para realizar la programación del lado del servidor.

El archivo base.php además, dispone de un script escrito en javascript, para la programación del lado del cliente, cuyo objetivo es extraer la información de la tabla html, almacenarla en variables locales, y mostrar una gráfica de fecha vs temperatura de los datos consultados. El gráfico 24-2 muestra la lógica de programación del script de javascript.

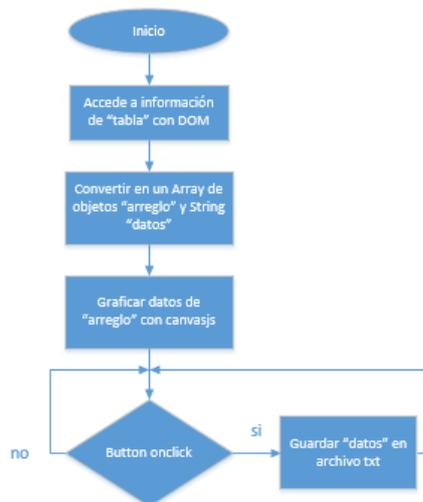


Gráfico 24-2: Diagrama de flujo html
 Realizado por: López, Denys; 2017.

1.-Accede a los datos de la tabla html, utilizando el modelo de objeto de documento (DOM) de JavaScript; los datos son almacenados como variables de objeto.

2.-Para poder graficar los datos se utilizó canvasjs, cuyo formato de entrada es un arreglo de objetos de pares del tipo: [{ x: Date1, y: Number1}, { x: Date2, y: Number3 },..., { x: DateN, y: NumberN}] por lo que, el objeto que contiene los datos debe ser transformado a este formato. Además, los datos son almacenados en una variable tipo String para poder posteriormente ser almacenados en un archivo de texto plano.

3.- Se establecen los parámetros de configuración de la gráfica y, con los datos del arreglo de objetos, canvasjs crea la gráfica.

4.- A través de un botón, el usuario puede escoger almacenar los datos en un archivo de tipo texto plano con codificación utf-8.

La librería utilizada para graficar los datos es:

Canvasjs.- es una librería escrita en JavaScript, con soporte para más de 30 tipos de gráficas, cuya renderización es soportada en dispositivos como: PC, MAC, Iphone, Android, etc. Puede ser descargar de su página oficial <https://canvasjs.com>.

Para facilitar el manejo y legibilidad del software, se establecieron las siguientes funciones:

- convertir(tabla).- recibe como parámetro de entrada el objeto de la tabla, y devuelve como parámetros de salida: un arreglo de objetos de los datos, a ser utilizados por canvasjs para crear la gráfica, y un String de los datos para ser guardados mediante la función descargarArchivo.

- descargarArchivo(nombreArchivo, texto).- permite generar y guardar el archivo de texto plano con los datos del nodo sensor. Recibe como parámetros de entrada: el nombre del archivo de salida tipo String y el texto a ser guardado tipo String.

2.7 Fabricación de placas de circuito impreso

La placa de circuito impreso fue realizada con la ayuda del software de diseño PCB Eagle 7.6.0 y su fabricación mediante el método de transferencia de tóner, en una placa de circuito impreso de cara simple (figura 14-2). Para más información de la técnica de transferencia de tóner referirse a la dirección <http://awww.instructables.com/id/Cheap-and-Easy-Toner-Transfer-for-PCB-Making/> y para información del manejo de Eagle referirse a su documentación oficial en la dirección: <http://eagle.autodesk.com/eagle/documentation>.

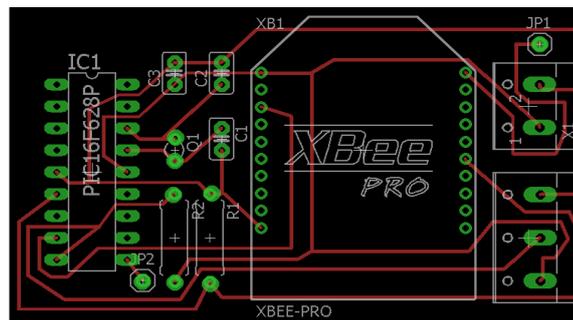


Figura 14-2: Diseño PCB de la carga en EAGLE
Realizado por: López, Denys; 2017.

Al igual que la carga, la placa de circuito impreso fue realizada con la ayuda del software de diseño PCB Eagle y el método de transferencia de tóner, para una placa de circuito impreso de cara simple (figura 15-2). Debido a lo alto de los valores de las resistencias de configuración, substancias tales como pastas de soldadura o flux podrían afectar considerablemente los valores reales obtenidos en comparación a los calculados, por tanto es recomendable realizar una limpieza adecuada de la placa de circuito impreso.

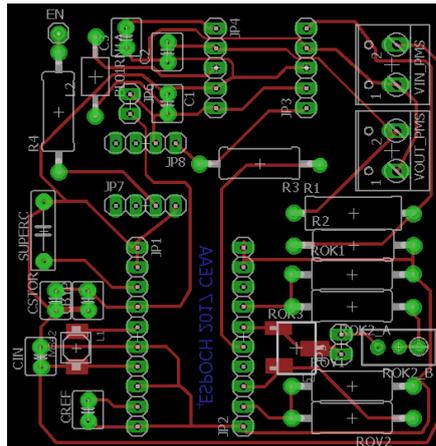


Figura 15-2: Diseño PCB del PMS en EAGLE
Realizado por: López, Denys; 2017.

Los circuitos integrados bq25505 y tps61200 vienen en formato tipo VQFN y VSON respectivamente, siendo complicada su manipulación para el desarrollo y pruebas del prototipo por lo cual, se construyó placas adaptadoras para facilitar su manejo como lo muestra la figura 16-2.

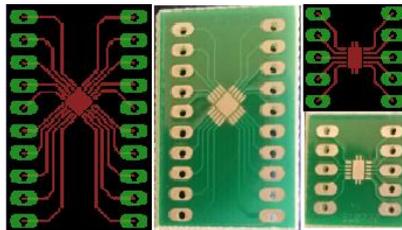


Figura 16-2: Diseño PCB del bq25505 y tps61200 en EAGLE
Realizado por: López, Denys; 2017.

Tanto la placa del sistema PMS como la de la carga fueron instaladas dentro de una caja plástica de dimensiones 11mmx11mmx60mm, conformando el nodo sensor mostrado en el gráfico 25-2.

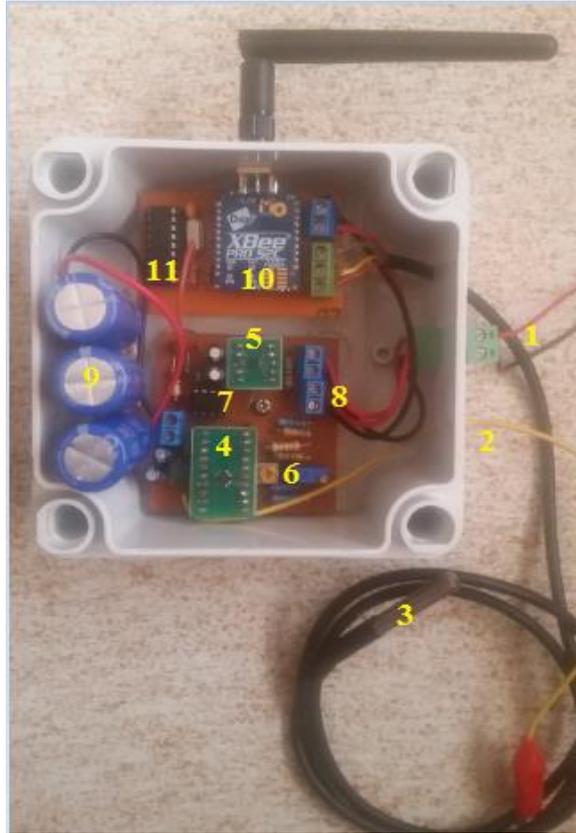


Gráfico 25-2: Nodo sensor de adquisición de temperatura
Realizado por: López, Denys; 2017.

- 1.-Entrada de fuente generadora VIN_PMS
- 2.-Entrada de MFC de referencia Ref MFC
- 3.- Sensor de temperatura ds18b20
- 4.- Circuito integrado Bq25505
- 5.- Circuito integrado TPS61200
- 6.- Resistencias variables para calibrar niveles VBAT_OK_PROG y VBAT_OK_HYST
- 7.- Optomosfet LBA716
- 8.-Salida de voltaje regulada VOUT_PMS
- 9.-Supercondensador
- 10.- XBee ZB S2C TH
- 11.-Microcontrolador 16f628a

CAPÍTULO III

3 MARCO DE RESULTADOS, DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran las mediciones y datos obtenidos de los subsistemas que conforman el equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas utilizando para ello, equipos y procedimientos adecuados para obtener resultados significativos. El análisis de datos se lo realizó mediante la utilización de estadística descriptiva, técnicas lógicas de análisis y síntesis.

3.1 Caracterización de celdas de combustible microbianas

El gráfico 1-3 muestra los valores de voltajes generados por las celdas de combustible microbianas MFC1, MFC2, MFC3 y MFC4 en estado estable; las mediciones se realizaron mediante una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 con una frecuencia de un minuto por un lapso de 24 horas. Posteriormente las MFCs fueron conectadas en paralelo y monitoreadas durante 24 horas.

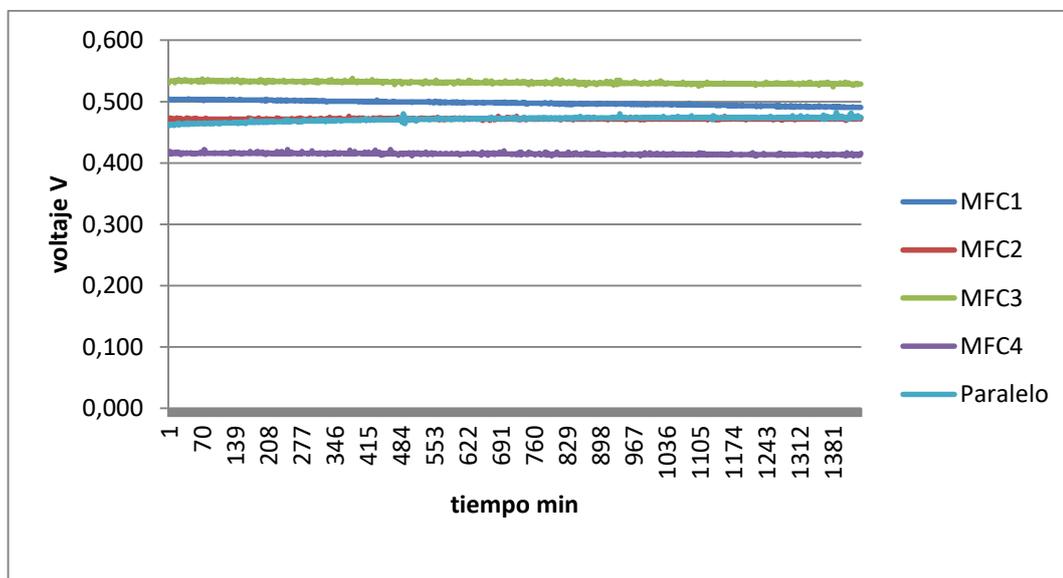


Gráfico 1-3: Voltajes en circuito abierto de MFCs individuales y en conexión paralelo
Realizado por: López, Denys; 2017.

Los estadísticos de los valores medidos se muestran en la tabla 1-3, mostrando estabilidad reflejada en las bajas desviaciones estándar de las mediciones.

Tabla 1-3: Estadísticos de voltajes en circuito abierto individual y paralelo de MFCs.

Estadístico	MFC1	MFC2	MFC3	MFC4	Paralelo
Media	0,498	0,472	0,531	0,415	0,471
Mediana	0,497	0,472	0,531	0,415	0,473
Moda	0,496	0,472	0,530	0,414	0,474
Desviación estándar	0,004	0,001	0,002	0,001	0,003
Rango	0,014	0,008	0,014	0,011	0,021
Mínimo	0,491	0,468	0,524	0,411	0,461
Máximo	0,505	0,476	0,538	0,422	0,482

Realizado por: López, Denys; 2017.

Para obtener la curva de potencia y polarización de las MFCs con conexión en paralelo, se utilizó resistencias variables de precisión de $2M\Omega$, $10\text{ k}\Omega$ y $1\text{ k}\Omega$, además un multímetro para medir los voltajes generados a diferentes valores de resistencia como lo muestra la tabla 2-3.

Tabla 2-3: Valores medidos y calculados para la obtención de las curvas de polarización y potencia de MFCs en paralelo.

Resistencia Ω	Voltaje V	Corriente mA	Potencia mW
2000000	0,472	0,000	0,000
10000	0,46	0,046	0,021
5000	0,453	0,091	0,041
3000	0,44	0,147	0,065
1500	0,41	0,273	0,112
1250	0,4	0,320	0,128
1100	0,39	0,355	0,138
1000	0,38	0,380	0,144
900	0,367	0,408	0,150
800	0,358	0,448	0,160
700	0,347	0,496	0,172
600	0,335	0,558	0,187
500	0,315	0,630	0,198
400	0,29	0,725	0,210
300	0,256	0,853	0,218
250	0,233	0,932	0,217
200	0,205	1,025	0,210
150	0,175	1,167	0,204
100	0,136	1,360	0,185
50	0,08	1,600	0,128
0	0	1,850	0,000

Realizado por: López, Denys; 2017.

La corriente que circula por el circuito fue calculada mediante la ley de Ohm $I = V/R$, mientras la potencia con la ecuación de potencia disipada en una resistencia $P = V^2/R$. El

gráfico 2-3 muestra las curvas de polarización y potencia obtenidas a partir de los datos medidos y calculados. Las curvas pueden ser normalizadas dividiendo los valores de corriente por el área del electrodo ánodo, en caso que se requiera comparar con otros sistemas.

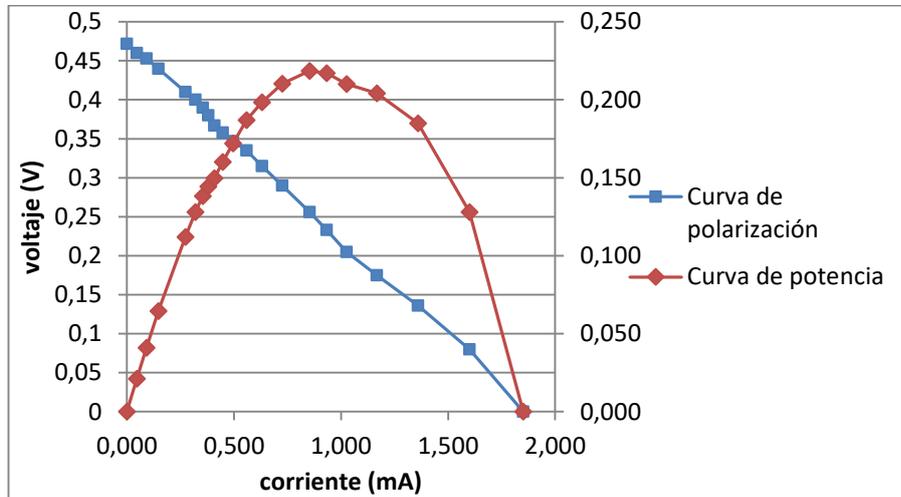


Gráfico 2-3: Curvas de potencia y polarización de MFCs con conexión en paralelo
Realizado por: López, Denys; 2017.

3.1.1 Curva de polarización de MFCs con conexión en paralelo

La curva de polarización fue ajustada a un modelo de regresión lineal simple con una bondad de ajuste R^2 del 99,8% como se observa en el gráfico 3-3.

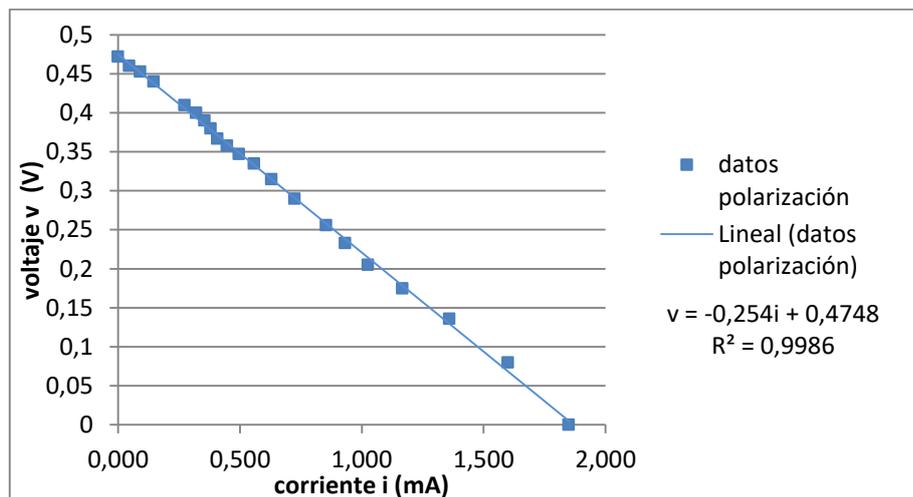


Gráfico 3-3: Curva de polarización de MFCs con conexión en paralelo.
Realizado por: López, Denys; 2017.

El corte de la recta en el eje de las abscisas es el valor de la corriente en cortocircuito mientras que el corte en el eje de las ordenadas el voltaje en circuito abierto. La pendiente de la recta es equivalente a la resistencia interna R_{int} debido a las pérdidas óhmicas en las MFCs:

$$R_{int} = \frac{dv}{di} = -0,254 \times 10^3$$

La resistencia interna de las MFCs con conexión en paralelo es de 254 Ω .

3.1.2 Curva de potencia de MFCs con conexión en paralelo

La curva de potencia sigue un modelo de regresión lineal polinomial de segundo grado con una bondad de ajuste R^2 del 99,38% como se observa en el gráfico 4-3.

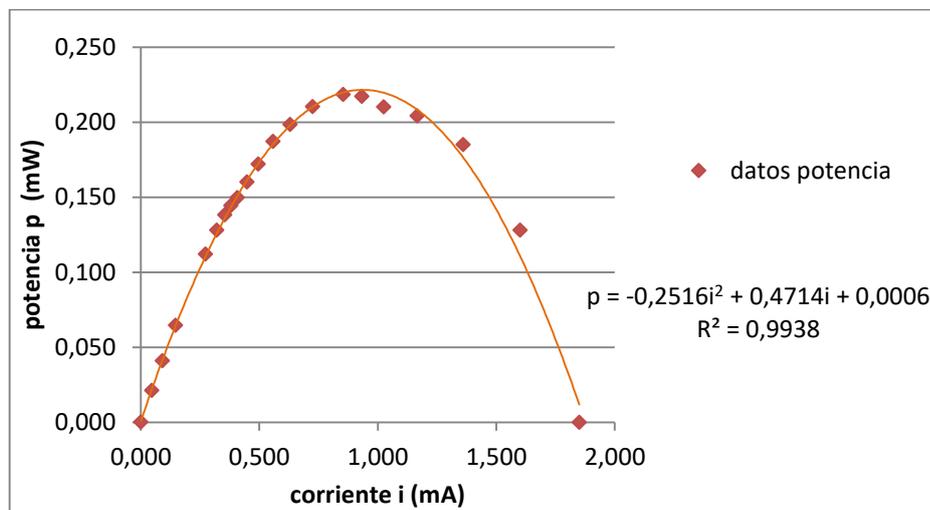


Gráfico 4-3: Curva de potencia MFCs con conexión en paralelo
Realizado por: López, Denys; 2017.

La máxima potencia entregada por las MFCs, se encuentra en el punto del vértice de la curva donde la pendiente es igual a cero:

$$\frac{dp}{di} = 0 = -0,5032i + 0,4714 \rightarrow i = 0,9368 \text{ mA}$$

$$p = -0,2516x(0,9368)^2 + 0,4714x(0,9368) + 0,0006 = 0,2214 \text{ mW}$$

El valor de voltaje en el que se encuentra la máxima potencia es:

$$P = V \times I; \quad V = \frac{0,2214 \text{ mW}}{0,9368 \text{ mA}} = 0,2363 \text{ V}$$

El punto (0,9368 mA, 0,2363 V) con una potencia de 0,2214 mW, es el punto de máxima potencia el cual, es importante conocer para establecer el nivel de voltaje al cual el circuito

bq25505 debe modular su entrada, para el funcionamiento del módulo de seguimiento de punto de máxima potencia MPPT.

3.2 Prueba de Consumo de energía en la carga

La figura 1-3 muestra el circuito electrónico utilizado para medir el consumo de energía en la carga.

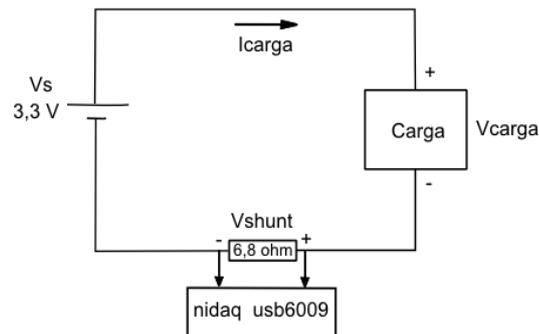


Figura 1-3: Circuito para medir la energía en la carga.
Realizado por: López, Denys; 2017.

La caída de voltaje en la resistencia shunt de $6,8\Omega$, fue medido con una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 con frecuencia de un milisegundo. La corriente que circula por la carga fue calculada mediante ley de Ohm:

$$I_{carga} = V_{shunt}/6,8$$

El voltaje en la carga es igual a la diferencia entre el voltaje de la fuente de alimentación V_s y el voltaje a través de la resistencia shunt:

$$V_{carga} = 3,3 - V_{shunt}$$

El gráfico 5-3 muestra las gráficas de corriente y voltaje adquiridas durante un periodo de transmisión por parte de la carga.

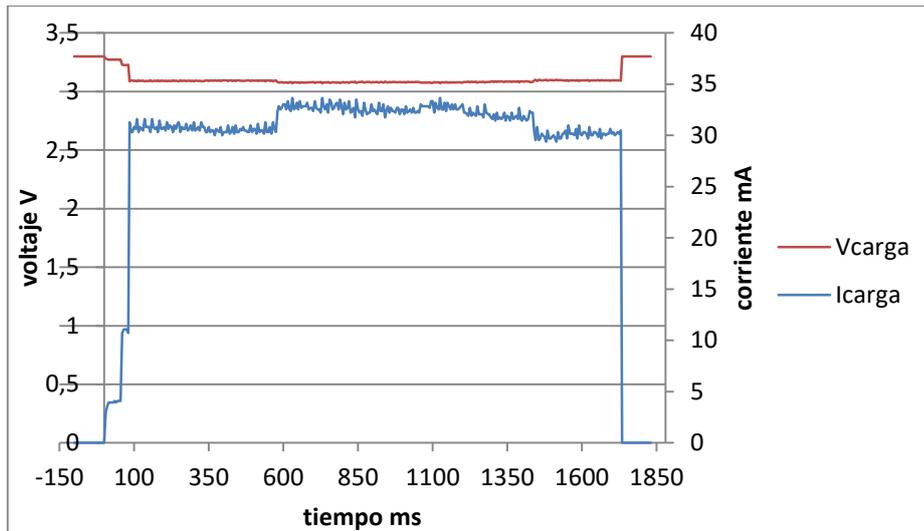


Gráfico 5-3: Voltaje y corriente a través de la carga
 Realizado por: López, Denys; 2017.

La potencia es igual al producto de la corriente por el voltaje mostrada en el gráfico 6-3, alcanzándose máximas potencias instantáneas cuando el módulo de radiofrecuencia Xbee transmite datos. Para hallar la energía total utilizada por la carga, se debe calcular la potencia promedio en un periodo de funcionamiento y multiplicarla por el tiempo de duración del mismo.

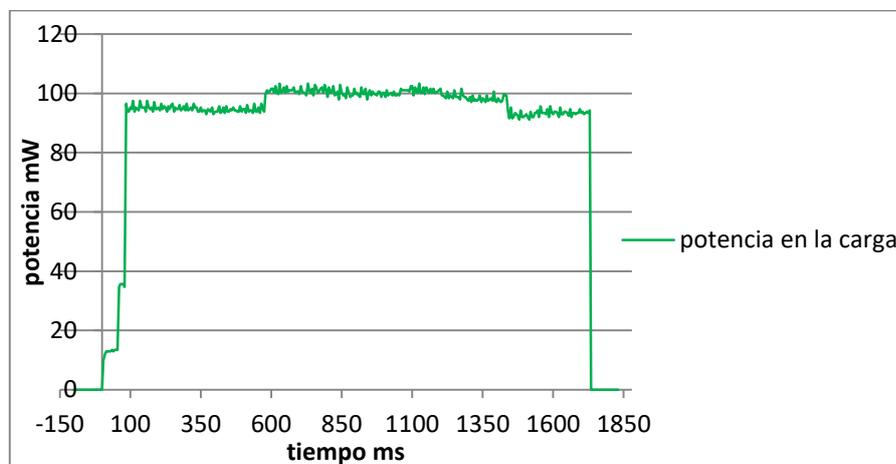


Gráfico 6-3: Potencias instantáneas en la carga
 Realizado por: López, Denys; 2017.

La tabla 3-3 muestra la potencia y energía consumida por la carga durante tres ciclos de funcionamiento, obteniendo un promedio de consumo de energía de 161,71 mJ.

Tabla 3-3: Valores de energía y potencia en la carga

Transmisión	1	2	3	promedio
Potencia promedio (mW)	93,65	93,22	93,28	93,38
Tiempo t (s)	1,73	1,74	1,725	1,73
Energía (mJ)	162,02	162,20	160,91	161,71

Realizado por: López, Denys; 2017.

3.3 Pruebas de comparación de datos

En esta prueba se compararon los datos registrados por el equipo de monitoreo implementado, con el termómetro datalogger HH309A. Para obtener datos con transmisiones puntuales y con menores tiempos, se simuló las MFCs con una fuente de voltaje a 500mV, conectada en serie con una resistencia de 55Ω, para alimentar al nodo sensor; el equipo se puso en funcionamiento con el nodo sensor transmitiendo y la estación la base receptando, a la vez que el datalogger registraba la temperatura con una frecuencia de 10 segundo, por un lapso de 12 horas. Como se observa en el grafico 7-3, durante este lapso de tiempo, la estación base registro 136 transmisiones las cuales fueron comparadas con los datos obtenidos del datalogger.

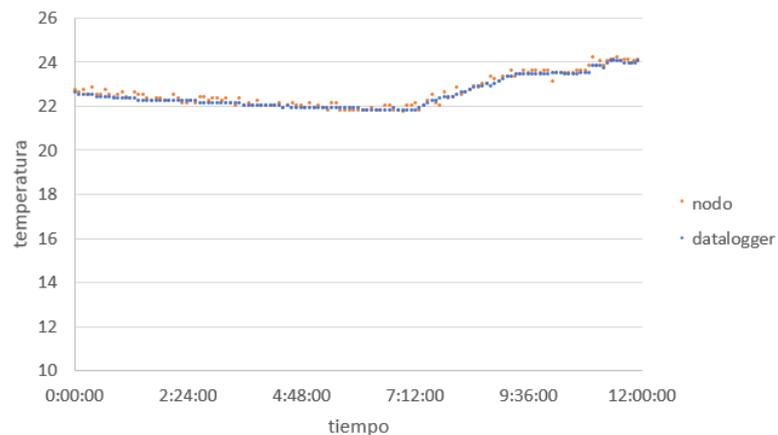


Gráfico 7-3: Prueba de comparación de datos

Realizado por: López, Denys; 2017.

El mayor error absoluto obtenido de la comparación fue de ± 0.4 y moda de 0 grados centígrados, siendo un valor aceptable teniendo en cuenta que el coeficiente de correlación calculado entre los dos conjuntos de datos fue de 0.983, lo cual indica una fuerte relación entre los datos registrados por el nodo sensor y por el instrumento de precisión.

3.4 Pruebas de transmisión y recepción de datos

Al igual que en la prueba anterior, el nodo sensor fue alimentado mediante la simulación de las MFCs, con el fin de observar si existen pérdidas de información ya sea por malfuncionamiento o desperfectos del nodo sensor o la estación base, a la distancia establecida para las pruebas de 61,91 metros. Se obtuvieron 845 transmisiones en un lapso de 60 horas, datos que pudieron ser visualizados (grafico 8-3) y descargados (grafico 9-3) fácilmente mediante la aplicación web.

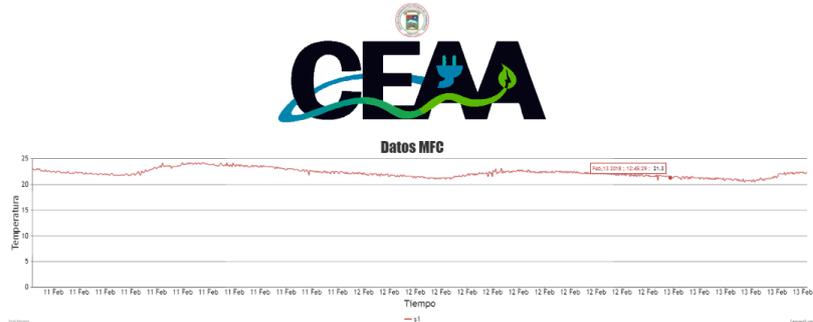


Gráfico 8-3: Página index.html para la presentación de datos
Realizado por: López, Denys; 2017.

TEMP	TIEMPO
23.1	2018-02-10 23:23:59
22.8	2018-02-10 23:29:48
22.8	2018-02-10 23:34:55
22.8	2018-02-10 23:39:56
23.1	2018-02-10 23:45:08
22.8	2018-02-10 23:50:28
23.0	2018-02-10 23:55:56
22.7	2018-02-11 00:01:29
22.6	2018-02-11 00:07:07
22.7	2018-02-11 00:12:45
22.5	2018-02-11 00:18:20
22.8	2018-02-11 00:23:54
22.5	2018-02-11 00:29:24
22.5	2018-02-11 00:34:53
22.7	2018-02-11 00:40:16
22.5	2018-02-11 00:45:35
22.4	2018-02-11 00:50:57
22.5	2018-02-11 00:56:16
22.6	2018-02-11 01:01:34
22.4	2018-02-11 01:06:51
22.3	2018-02-11 01:12:08

Gráfico 9-3: Documento de texto plano descargado, de los datos del nodo sensor
Realizado por: López, Denys; 2017.

No se observaron transmisiones a intervalos superiores a 5.5 minutos y, debido a que el promedio de transmisión fue de 4.26 minutos, no existió ninguna pérdida de información, ni recepción de datos inválidos durante la prueba.

3.5 Pruebas de repetitividad del sistema

Con el fin de obtener muestra rápidas, el nodo sensor fue conectado directamente a un voltaje de 0.5 V con una resistencia de 10 ohmios con lo cual, se registraron aproximadamente transmisiones cada 5 segundos. Como muestra la tabla 1-1, en el periodo de dos minutos, se obtuvieron 26 muestras de las cuales, se calculó la media y desviación estándar con el fin de calcular el coeficiente de variación, teniendo este último un valor de 0,278233%, reflejándose

poca variabilidad en los datos medidos por el sistema y determinándose la estabilidad del mismo.

MUESTRA	HORA	VALOR
1	13:37:01	21,8
2	13:37:06	21,8
3	13:37:11	21,8
4	13:37:15	21,8
5	13:37:20	21,7
6	13:37:25	21,8
7	13:37:30	21,8
8	13:37:35	21,8
9	13:37:39	21,8
10	13:37:44	21,8
11	13:37:49	21,8
12	13:37:54	21,8
13	13:37:58	21,9
14	13:38:03	21,8
15	13:38:08	21,8
16	13:38:13	21,8
17	13:38:18	21,7
18	13:38:23	21,7
19	13:38:27	21,8
20	13:38:32	21,8
21	13:38:37	21,8
22	13:38:42	21,6
23	13:38:47	21,7
24	13:38:51	21,7
25	13:38:56	21,7
26	13:39:01	21,7
MEDIA		21,77
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,061
COEFICIENTE DE VARIACIÓN		0,278233%

3.6 Pruebas en el nodo sensor

El gráfico 10-3 muestra la configuración utilizada para evaluar el desempeño del nodo sensor, monitoreándose los voltajes en el supercondensador, entrada y salida del PMS mediante una tarjeta de adquisición NI USB-6009.

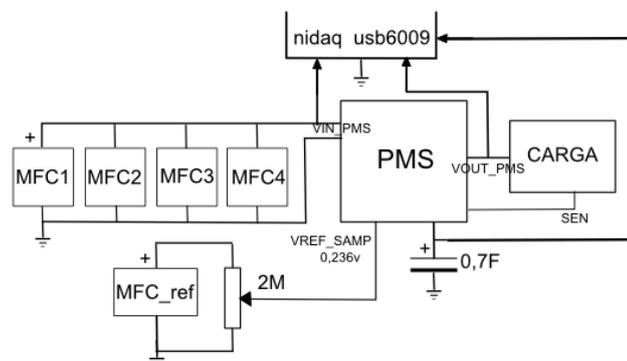


Gráfico 10-3: Diagrama de pruebas del sistema
Realizado por: López, Denys; 2017.

Para las pruebas se establecieron los siguientes parámetros de trabajo:

-Las MFCs conectadas en paralelo a la entrada del PMS VIN_PMS

-La MFC de referencia se conecta a un potenciómetro de 2 M Ω con el fin de obtener el voltaje de referencia al cual se da la máxima transferencia de potencia, cuyo valor es de 0,236 V e ingresa al terminal VREF_SAMP del bq25505

-El supercondensador de 0,7 F conectado al PMS completamente descargado

-La carga conectada a la salida del PMS VOUT_PMS

-La estación base encendida y preparada para recibir los datos enviados por el nodo sensor

-Los niveles VBAT_OK_PROG y VBAT_OK_HYST calibrados en valores de 2,44V y 2,38V respectivamente.

3.6.1 Prueba de carga del supercondensador del nodo sensor

Se realizó una prueba para determinar el tiempo que tarda el PMS en cargar el supercondensador completamente descargado, hasta el nivel de voltaje de VBAT_OK_HYST. La prueba se la realizó con un tiempo de muestreo de 1 minuto adquiriendo el voltaje en el supercondensador como se observa en el gráfico 11-3.

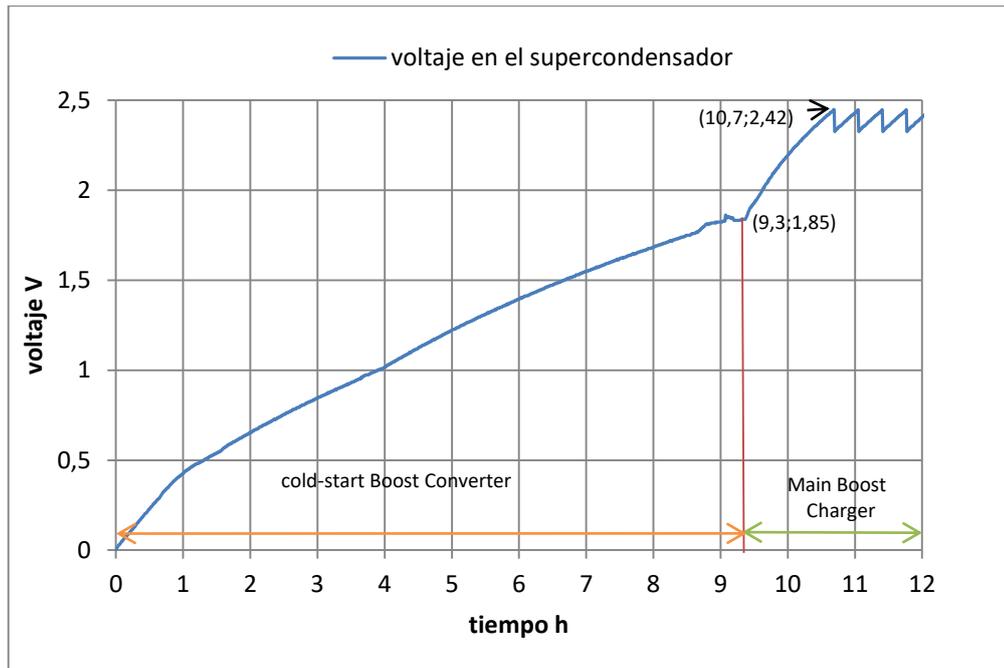


Gráfico 11-3: Carga del supercondensador de 0,7 faradios
 Realizado por: López, Denys; 2017.

Se distinguen dos zonas de carga; una donde el supercondensador es cargado por el convertidor de baja eficiencia “cold-start” del bq25505 y otra donde es activado el convertidor de alta eficiencia “Main Boost Charger” con seguimiento de punto de máxima potencia del mismo. La transición se consigue una vez superado el valor de $V_{STOR_CHGEN} = 1,8 \text{ V}$. La energía almacenada en un condensador se calcula con la fórmula:

$$E = \frac{1}{2} C (V_2^2 - V_1^2)$$

Dónde:

- E es la energía almacenada en el condensador en julios
- C es la capacitancia del condensador en faradios
- V_1 es el voltaje inicial de carga en voltios
- V_2 es el voltaje final de carga en voltios

La potencia es la cantidad de energía absorbida por unidad de tiempo y se calcula mediante:

$$P = E/t$$

Tabla 4-3: Valores de energía almacenada en el supercondensador y potencia suministrada por los convertidores

Convertidor	Cold-start boost converter	Main boost charger
V ₁ (V)	0	1,85
V ₂ (V)	1,85	2,42
Tiempo (h)	9,3	1,4
E _{scap} (J)	1,20	0,85
Potencia (mW)	0,0358	0,1690

Realizado por: López, Denys; 2017.

Como se observa en la tabla 4-3 la velocidad del convertidor Main Boost Charger fue 4,72 veces mayor que la del convertidor cold-start, con un tiempo de carga del supercondensador, desde 0 hasta 2,44 V, de 10,7 horas.

3.6.2 Prueba de nodo sensor en modo de trabajo

En esta prueba se monitoreo el voltaje de entrada y salida del PMS así como el voltaje del supercondensador, con el fin de evaluar el sistema en modo de trabajo, cuyos datos adquiridos se muestran en el gráfico 12-3. El supercondensador se carga y descarga intermitentemente cada vez que el nodo sensor transmita un dato hacia la estación base; la descarga inicia una vez alcanzado el nivel VBAT_OK_HYST de 2,44 V y comenzará a cargarse nuevamente una vez se haya concluido la transmisión. La salida de voltaje del PMS en cada periodo de descarga es de 3,3 V mientras que su entrada se mantiene constante al valor del punto de máxima potencia de 0,236 V.

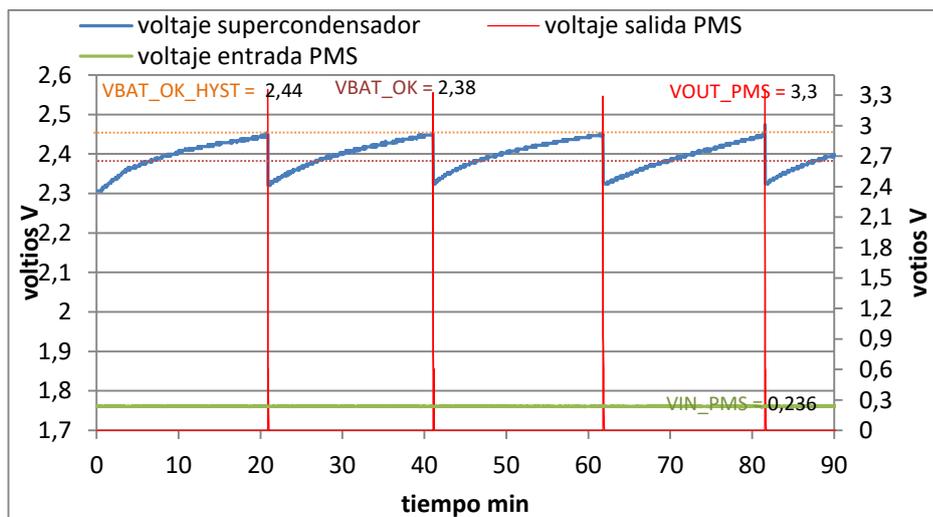


Gráfico 12-3: Carga del supercondensador en modo de trabajo

Realizado por: López, Denys; 2017.

La eficiencia alcanzada por el bq25505 en cada periodo de transmisión se calcula con la fórmula:

$$\eta_{\text{bq25505}} = \frac{E_{\text{scap}}}{E_{\text{MFC}}} \times 100$$

Dónde:

- E_{MFC} es la energía entregada por las MFCs y es igual a la potencia entregada (0,2214 mW), multiplicado por el tiempo de carga de cada periodo.

- E_{scap} es la energía almacenada en el supercondensador en cada periodo, calculada mediante:

$$E = \frac{1}{2} C (V_2^2 - V_1^2)$$

La tabla 5-3 muestra los valores de energía almacenados en el supercondensador realizados en cuatro transmisiones del nodo sensor; con estos valores es posible calcular la eficiencia del bq25505.

Tabla 5-3: Valores de energía almacenada en cada periodo de transmisión del nodo sensor

Transmisión	1	2	3	4	Promedio
V1 (v)	2,321	2,321	2,325	2,330	2,32
V2 (v)	2,438	2,443	2,448	2,443	2,44
Tiempo (min)	19,9	20,53	21,1	20,2	20,43
E_{scap} (mJ)	195,96	204,30	204,72	188,41	198,35
E_{MFC} (mJ)	264,35	272,72	280,29	268,34	271,43
Eficiencia η_{bq25505} (%)	74,13	74,91	73,04	70,21	73,08

Realizado por: López, Denys; 2017.

Ya que el consumo aproximado de energía por parte de la carga es de alrededor de 161,71 mJ, la eficiencia del convertor tps61200 es:

$$\eta_{\text{tps1200}} = \frac{E_{\text{output}}}{E_{\text{input}}} \times 100 = \frac{161,71\text{mJ}}{198,35\text{mJ}} \times 100 = 81,53 \%$$

La eficiencia global del PMS es:

$$\eta = \frac{E_{output}}{E_{MFC}} \times 100 = \frac{161,71mJ}{271,43mJ} \times 100 = 59,58 \%$$

o bien $\eta = \eta_{tps1200} \times \eta_{bq25505} / 100 = 59,58 \%$

Las pérdidas de energía en el PMS son:

$$Ep = Ep_{bq25505} + Ep_{tps1200} = E_{MFC} * (1 - 0,7308) + E_{MFC} * 0,7308 * (1 - 0,8153)$$

$$Ep = E_{MFC} * 0,269 + E_{MFC} * 0,135$$

Por lo tanto:

$$Ep_{bq25505} = 26,9 \% \quad ; \quad Ep_{tps1200} = 13,5 \%$$

3.7 Análisis y discusión

3.7.1 Tiempo de carga en arranque en frio

El sistema de administración de energía tiene la capacidad de empezar su funcionamiento con el dispositivo de almacenamiento totalmente descargado y sin la necesidad de fuentes de alimentación externas gracias al módulo de arranque en frio cold-start del circuito integrado bq25505 sin embargo, como se observa en la tabla 6-3, el tiempo de carga del supercondensador hasta alcanzar el modo de trabajo normal es muy alto.

Tabla 6-3: tiempos de carga en arranque en frio y trabajo normal

Intervalo de voltaje (V)	Tiempo (Horas)
0 a 2,44	10,7
2,32 a 2,44	0,34

Realizado por: López, Denys; 2017.

El tiempo de carga puede incluso prolongarse varios días en el caso de requerirse un supercondensador de mayor capacidad, para abastecer cargas con un mayor consumo energético o cuando la densidad de potencia de las MFCs es muy pobre por tanto, para evitar tiempos de carga excesivamente prolongados, es recomendable utilizar un supercondensador previamente cargado por encima del valor de VSTOR_CHGEN o en el mejor de los casos cercano al valor de VBAT_OK_HYST.

3.7.2 Rendimiento del sistema de administración de energía

La tabla 7-3 resume el rendimiento presentado en el PMS para el caso de estudio, obteniéndose una eficiencia total del 59,58 por ciento, con pérdidas en los circuitos integrados bq25505 y tps61200 del 26,9 y 13,5 por ciento respectivamente. La eficiencia total puede ser mejorada disminuyendo las pérdidas debido a los circuitos integrados mencionados y con la elección adecuada del dispositivo de almacenamiento como supercondensadores con baja corriente de fuga y baja resistencia serie equivalente.

Tabla 7-3: Eficiencias y pérdidas en el PMS

Voltaje de entrada (V)	0,236
Potencia de entrada (mW)	0,2214
Voltaje de salida (V)	3,3
Potencia útil de salida (mW)	161,71
Eficiencia total (%)	59,58
Eficiencia tps61200 (%)	81,53
Eficiencia bq25505 (%)	73,08
Perdidas en tps61200 (%)	13,5
Perdidas en bq25505 (%)	26,9

Realizado por: López, Denys; 2017.

3.7.3 Mejora de la eficiencia en el bq25505

En el caso del bq25505 como se observa en el gráfico 13-3, la eficiencia puede ser mejorada por encima del 80 por ciento si se incrementa la corriente de entrada a 10 mA para un voltaje de entrada igual o mayor a 0,3 V.

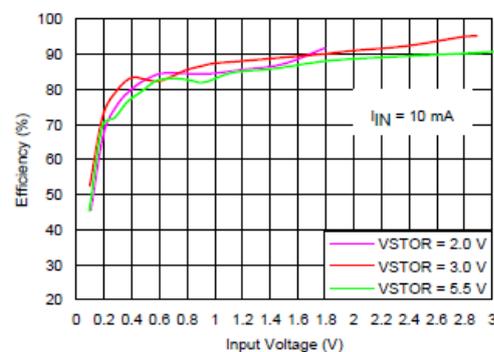


Gráfico 13-3 Eficiencia del bq25505 con corriente de 10mA

Fuente: (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>)

Hong et al realizó un estudio en 2008 donde instaló celdas de combustible microbianas sedimentarias en un lago por un periodo de seis meses, utilizando como materiales para la

construcción de los electrodos platos y espuma de carbono. El gráfico 14-3 muestra el voltaje en circuito abierto y la corriente para una carga de 10 ohmios alcanzadas por las SMFCs de Hong, obteniéndose una corriente máxima promedio 20,4 mA y un voltaje en circuito abierto por encima de los 0,5 V. Posteriormente conectaron 2 SMFCs en paralelo obteniendo una corriente superior a 33mA. Si se evaluase el desempeño del bq25505 en las SMFCs construidas por Hong et al, la eficiencia podría ser superior al 80 por ciento.

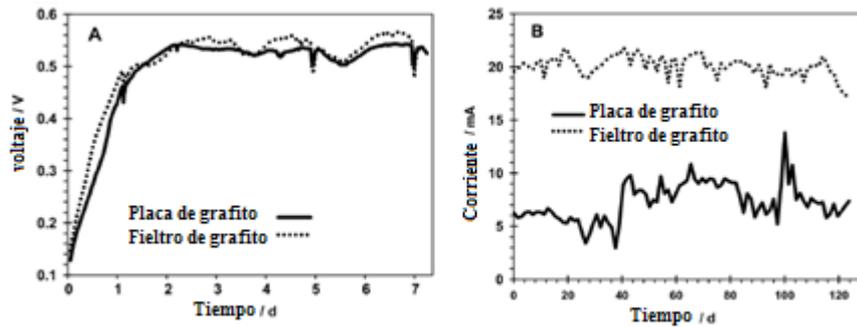


Gráfico 14-3: A.- Voltaje en circuito abierto SMFCs B.- corriente en SMFCs
Fuente: (Hong et al., 2008)

3.7.4 Mejora de la eficiencia en el tps61200

Como se observa en el gráfico 15-3 la eficiencia del tps61200 para una salida de 3,3V, con un voltaje de entrada de 2,4 V, es superior al 80% para corrientes mayores a 30mA llegando a un rendimiento máximo del 89% para una corriente de 400mA. Se reportaría una mejora en el rendimiento del tps61200 en cargas con un consumo relativamente alto no mayor a un amperio.

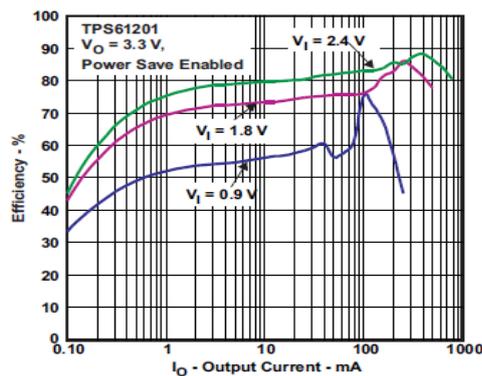


Gráfico 15-3: Curvas de rendimiento del tps61200
Fuente: (www.ti.com/lit/ds/symlink/tps61200.pdf)

3.7.5 Rendimiento máximo estimado en el sistema de administración de energía

Acorde a lo anteriormente mencionado y con valores de eficiencia tomados de los datasheets de los circuitos integrados bq25505 y tps61200, la máxima eficiencia estimada alcanzada por el PMS es:

$$\eta_{maxpms} = \eta_{maxbq25505} * \eta_{maxtps61200} * 100 = 0,8 * 0,89 * 100 = 71,2 \%$$

Dónde:

- $\eta_{maxbq25505}$ es la eficiencia máxima estimada en el bq25505

- $\eta_{maxtps61200}$ es la eficiencia máxima estimada en el tps61200

La tabla 8-3 muestra las eficiencias reportadas en algunos tipos de sistemas PMS que no requieren de fuentes de alimentación externa ni conexión de MFC en paralelo para elevar el voltaje.

Tabla 8-3: Sistemas de administración de energía reportados en diferentes estudios

Tipo	MFC	entrada V	eficiencia %	Referencia
Capacitor-boost converter	sedimentar	0,4	55	Wotawa-Bergen et al,2010
Capacitor-transformador-boost converter	cámara simple	0,475	58	Adami et al, 2011
Capacitor-charge pump-boost converter	sedimentar	0,052-0,32	<70	donovan et al, 2008
Seguimiento de punto de máxima potencia	cámara simple	0,3	73	Degrenne et al,2012
Seguimiento de punto de máxima potencia	cámara simple	0,3	66,5-80,6	Degrenne et al,2011
sistema basado en circuito integrado	cámara doble	0,6-7	<85	Zhang et al, 2015
Boost C.I con seguimiento de punto de máxima potencia	sedimentar	0,236	59,58	Propuesto

Fuente: Wang et al, 2015

Realizado por: López, Denys; 2017.

El sistema PMS propuesto entra en la categoría de sistema basado en circuitos integrados tipo boost converter con seguimiento de punto de máxima potencia, con una eficiencia máxima estimada de 71,2%, capaz de funcionar desde 100mV y con una salida de 3,3V con corriente máxima de 1A.

3.7.6 Consumo de energía en la carga

Acorde con la tabla 5-2 de consumos de dispositivos de la carga, el módulo de radiofrecuencia Xbee es el dispositivo con el consumo predominante en el sistema, con un valor del 92,62% del

total de dispositivos, seguido del sensor de temperatura con un 2,81% sin embargo, este requiere solo de 93,75 milisegundos para obtener y transmitir un dato de temperatura por lo cual su consumo real estaría muy por debajo del 2,81% mencionado, pudiendo considerarse incluso despreciable. Cosa similar ocurre con el microcontrolador con un consumo del 1,68 % durante un corto periodo de tiempo, pudiendo su consumo considerarse también despreciable.

Por las razones anteriormente mencionadas y debido a que el módulo de radiofrecuencia Xbee permanece en actividad durante la mayor parte del tiempo que dura una transmisión, la potencia de consumo de la carga puede ser considerada como la potencia del módulo de radiofrecuencia Xbee en modo de transmisión que acorde a su hoja de datos es de 108,9 mW. La potencia promedio medida en un periodo de funcionamiento fue de 93,38 mW lo cual es 15,52 mW menos que el consumo estimado; esta diferencia se debe principalmente a que existen instantes de tiempo (al principio y al final) donde el módulo Xbee se encuentra en modo de espera o idle y puede ser claramente observado en el gráfico 6-3. La tabla 9-3 muestra algunos tipos de sensores que podrían ser añadidos al nodo sensor con bajo consumo energético.

Tabla 9-3: Diferentes tipos de sensores con bajo consumo energético

Sensor	Tipo	Alimentación V	Muestreo S	Consumo mW
dht11	temperatura y humedad	3 a 5,5	1	3,3
DS18B20	temperatura sumergible	3 a 5,5	0,094	3,3
BMP180	presión atmosférica	1,8 a 3,6	1	0,023
RF-04	lluvia	5	*	75
AMBI	luz	0,3 a 7	0,1	3,3

Realizado por: López, Denys; 2017.

*al ser un dispositivo analógico, el tiempo de muestreo depende de la velocidad de conversión del ADC que por lo general es del orden de los microsegundos.

Si se quiere incrementar el número de sensores en el nodo, es necesario incrementar el número de cadenas JSON a ser enviadas, una por cada sensor; cada cadena JSON está compuesta aproximadamente por 20 caracteres o 160 bits por lo que si se quiere incrementar el número de sensores a cuatro se deberá enviar 80 caracteres o 640 bits. La velocidad de transmisión del módulo de radiofrecuencia Xbee acorde a su datasheet es de 250 Kbps, además de poseer una velocidad máxima de comunicación entre interfaces seriales de 115200 bps si se utiliza UART o 1Mbps si se utiliza SPI. Por lo mencionado, debido a que el tamaño de las cadenas JSON que contienen la información de los sensores es muy pequeño en comparación a la velocidad del dispositivo, aumentar el número de sensores en el nodo no incrementaría el consumo de la carga en una manera significativa en cuanto a envío de datos se refiere.

CONCLUSIONES

-Se diseñó e implementó el sistema de transmisión y recepción de datos sensoriales tomando en cuenta que las transmisiones tenían que ser periódicas y con un consumo de energía mínimo debido a la baja potencia entregada por las MFCs, razón por la cual el sistema fue una red de tipo punto a punto con protocolo bajo el estándar IEEE 802.15.4 permitiendo, tiempos de transmisión cortos reflejándose en un consumo de potencia mínimo en comparación a protocolos más complejos como Zigbee o Digimesh

-Se construyeron cuatro celdas de combustible sedimentarias las cuales, registraron un promedio de voltaje en circuito abierto de 0,498, 0,472, 0,531 y 0,415 V respectivamente, para después ser conectadas en paralelo obteniéndose un voltaje en circuito abierto de 0,471V muy por encima del valor mínimo requerido por el PMS (100mV) asegurando así su correcto funcionamiento. La estabilidad de las mismas fue determinada por las bajas desviaciones estándar registrada en la prueba.

-Con la ayuda del método de caja de resistencias, se obtuvo las curvas de polarización potencia de las MFCs conectadas en paralelo de las cuales, se determinó que su resistencia interna fue de 254Ω generando una potencia máxima de 0,221mW con una corriente de 0.4mA y 0.236V al conectarse una resistencia equivalente; este valor de voltaje fue utilizado para configurar el sistema de seguimiento de máxima transferencia de potencia del PMS.

-Se realizaron pruebas de consumo y funcionamiento del equipo, determinándose que la carga tenía un consumo promedio de 161,71 mW en 1,73 segundos de funcionamiento y un consumo energético de 93,38m J. El sistema PMS fue capaz de cumplir con la demanda energética de la carga, permitiendo transmisiones de temperatura con una frecuencia de 20,43 minutos en promedio registrándose una eficiencia del 59,58 %.

- Con la prueba de arranque en frío se determinó que el tiempo de carga del supercondensador, hasta alcanzar la primera transmisión fue de 10,7 horas; este tiempo prolongado solo se presenta cuando el supercondensador arranca con un nivel de voltaje nulo.

-El sistema de administración de energía escogido e implementado se basó en el circuito integrado bq25505 y tps6200. El bq25505 permitió cargar un supercondensador con la energía requerida por la carga a una eficiencia del 73,08% mientras que el tps6200 brindaba una salida de voltaje regulada de 3,3 V con una eficiencia del 81,53. El sistema entra en la categoría PMS

basado en circuitos integrados tipo boost converter con seguimiento de punto de máxima potencia mostrando una eficiencia aceptable del 59,58 %.

-La estación base capto los datos enviados por el nodo sensor y los almacenó en una base de datos para poder ser consultados efectivamente a través de una página web. No se registraron pérdidas de datos durante 60 horas de monitoreo.

-De la prueba de comparación de datos, se determinó que el mayor error absoluto entre el sistema implementado y un equipo de medición de referencia, no supera los ± 0.4 grados, que con una correlación entre datos del 98,3 %, se determinó la validación de los datos obtenidos por el sistema.

-Con la prueba de repetitividad mostro un bajo coeficiente de variación del 0,278%, valor que determina que las mediciones realizadas por el sistema exhibe poca variabilidad y determina la estabilidad del sistema.

RECOMENDACIONES

- El sistema PMS implementado obtiene una mejor eficiencia para MFCs que generan una potencia mayor al del estudio, razón por la cual se recomienda ampliar el estudio para mejorar la potencia generada por MFCs que implican campos como la biotecnología, materiales, química y electrónica.

-Realizar los cálculos y pruebas de consumo de carga con el fin de seleccionar el supercondensador adecuado que supla adecuadamente las demandas de energía, evitando valores demasiados bajos que podrían conllevar a descargarlo por debajo de valores críticos o valores altos que den como resultado tiempos de carga demasiado prolongados.

- La carga debe ser cuidadosamente diseñada con el fin de obtener el mínimo consumo posible para ello, se debe conocer y entender perfectamente su funcionamiento con el fin de utilizar recursos como modo de espera, reposo, desactivación de recursos, aviso de tarea concluida, etc. que suelen poseer algunos dispositivos con el fin de optimizar el consumo energético.

-Para aplicaciones en campo, tomar en cuenta el carácter dinámico que poseen las MFCs donde por lo general los parámetros de voltaje y potencia suelen cambiar en función de variables como: temperatura, ph, oxígeno disuelto en el medio, actividad microbiana, tipo de sustrato, etc por lo que los tiempos de transmisión ya no pueden ser tan predecibles como cuando se utiliza MFCs de laboratorio con variables controladas.

-Se debe tener especial cuidado al escoger el supercondensador a utilizarse en la aplicación; debe poseer una baja corriente de fuga para evitar que se descargue a sí misma y una baja ESR para evitar pérdidas resistivas que puedan tener un efecto significativo en el rendimiento del sistema

BIBLIOGRAFÍA

1. **GUO, Kun; et al.** *Microbial Fuel Cells : Electricity Generation from Organic Wastes by Microbes*, Oxon United Kingdom: R. Arora, 2012, pp. 162-189, ISBN 9781845939564.
2. **LOGAN, Bruce.** *Microbial Fuel Cells*. Hoboken, New Jersey-USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 1-110
3. **DEGRENNÉ, Nicolas; et al.** “Comparison of 3 self-starting step-up DC:DC converter topologies for harvesting energy from low-voltage and low-power microbial fuel cells”. *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2011, pp. 1–10.
4. **EWING, Timothy; et al.** “Scale-up of sediment microbial fuel cells”. *Journal of Power Sources* [en línea], 2014, Vol. 272, pp. 311–319, [Consulta: 22 enero 2017]. DOI 10.1016/j.jpowsour.2014.08.070, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.08.070>
5. **HONG, Seok Won; et al.** “Field Experiments on Bioelectricity Production from Lake Sediment Using Microbial Fuel Cell Technology”. *Production*, 2008, Vol. 29, no. 11, pp. 2189–2194.
6. **IEROPOULOS, Ioannis; et al.** “Microbial fuel cells based on carbon veil electrodes: Stack configuration and scalability”. *International Journal of Energy Research*, 2008, Vol. 32, no. 13, pp. 1228–1240, DOI 10.1002/er.1419.
7. **LEE, Yoo Seok; et al.** “Increased power in sediment microbial fuel cell: Facilitated mass transfer via a water-layer anode embedded in sediment”. *PLoS ONE* [en línea], 2015, Vol. 10, no. 12, pp. 1–12, [Consulta: 12 enero 2017], DOI 10.1371/journal.pone.0145430, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0145430>
8. **LOGAN, Bruce; et al.** “Microbial fuel cells: Methodology and technology”. *Environmental Science and Technology*, 2006. Vol. 40, no. 17, pp. 5181–5192. DOI 10.1021/es0605016.

9. **LOGAN, Bruce; et al.** “Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells”. *Environmental Science and Technology*, 2007, Vol. 41, no. 9, pp. 3341–3346, DOI 10.1021/es062644y.

10. **LOVLEY, Derek R.** “Bug juice: harvesting electricity with microorganisms”. *Nature Reviews Microbiology* [en línea], 2006, Vol. 4, no. 7, pp. 497–508, [Consulta: 16 diciembre 2016], DOI 10.1038/nrmicro1442, Disponible en: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nrmicro1442>

11. **PARK, Jae-Do; & REN, Zhiyong.** “Efficient energy harvester for microbial fuel cells using DC/DC converters”. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011, pp. 3852–3858, DOI 10.1109/ECCE.2011.6064292.

12. **PIETRELLI, Andrea; et al.** “Efficient Energy Harvesting for Microbial Fuel Cell dedicated to Wireless Sensor Network”. *2015 XVIII AISEM Annual Conference Efficient*, 2015, pp. 1–4.

13. **RAHIMNEJAD, Mostafa; et al.** “Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review”. *Alexandria Engineering Journal* [en línea], 2015, Vol. 54, no. 3, pp. 745–756, [Consulta: 19 diciembre 2016], DOI 10.1016/j.aej.2015.03.031, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.031>

14. **RAMARAJA, Ramasamy; & Narendran, Sekar.** “Electrochemical Impedance Spectroscopy for Microbial Fuel Cell Characterization”. *Journal of Microbial & Biochemical Technology* [en línea], 2013, pp. 1212-1220, [Consulta: 13 febrero 2017], DOI 10.4172/1948-5948.S6-004, Disponible en: <https://www.omicsonline.org/electrochemical-impedance-spectroscopy-for-microbial-fuel-cell-characterization-1948-5948.S6-004.php?aid=18518>

15. **RINALDI, Antonio; et al.** “Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review”. *Energy & Environmental Science* [en línea], 2008, Vol. 1, no. 4, pp. 417-420, [Consulta: 22 febrero 2017], DOI 10.1039/b806498a, Disponible en: <http://xlink.rsc.org/?DOI=b806498a>

16. **TENDER, Leonard M.; et al.** “The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: Powering a meteorological buoy”. *Journal of Power Sources*, Vol. 179, no. 2 (2008), pp. 571–575.

17. **WANG, Heming, PARK; et al.** “Practical Energy Harvesting for Microbial Fuel Cells: A Review”. *Environmental Science & Technology* [en línea], 2015, Vol. 49, no. 6, pp. 3267–3277, [Consulta: 03 noviembre 2016], DOI 10.1021/es5047765, Disponible en: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es5047765>

18. **WU, Peter K.; et al.** “A low power DC/DC booster circuit designed for microbial fuel cells”. *Process Biochemistry* [en línea], 2012, Vol. 47, no. 11, pp. 1620–1626, [Consulta: 27 junio 2017], DOI 10.1016/j.procbio.2011.06.003, Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procbio.2011.06.003>

19. **XU, Xun; et al.** “Biodegradation of organic matter and anodic microbial communities analysis in sediment microbial fuel cells with/without Fe(III) oxide addition”. *Bioresource Technology*, 2017, Vol. 225, pp. 402–408, DOI 10.1016/j.biortech.2016.11.126.

20. **ZAA, Lewandowski.** “Energy harvesting with microbial fuel cell and power management system”. *IEEE Trans. Power Electron*, 2011, Vol. 26, no. 1, pp. 176-180.

21. **ZABIHALLAHOOR, Atieh; et al.** “Sediment microbial fuel cells as a new source of renewable and sustainable energy: present status and future prospects”. *RSC Adv.* [en línea], 2015, Vol. 5, no. 114, pp. 94171–94183, [Consulta: 20 julio 2017], DOI 10.1039/C5RA15279H, Disponible en: <http://xlink.rsc.org/?DOI=C5RA15279H>

22. **ZHANG, Daxing; et al.** “Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices”. *Journal of Power Sources*, 2012, Vol. 217, no. October, pp. 65–71. DOI 10.1016/j.jpowsour.2012.06.013.

23. **ZHANG, Fei; et al.** “Powering a wireless temperature sensor using sediment microbial fuel cells with vertical arrangement of electrodes”. *Journal of Power Sources*, 2011, Vol. 196, no. 22, pp. 9568–9573, DOI 10.1016/j.jpowsour.2011.07.037.