

**DISEÑO ELECTRÓNICO CON PANEL SOLAR PARA EXTENDER LA VIDA DE UN NODO EN
UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES (WSN)**



JOSE ANTONIO DEL RIO MALO

Los Libertadores
Fundación Universitaria

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, D. C.
2018**

**DISEÑO ELECTRÓNICO CON PANEL SOLAR PARA EXTENDER LA VIDA DE UN NODO EN
UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES (WSN)**

JOSE ANTONIO DEL RIO MALO



Trabajo de grado para optar El Título de Ingeniero Electrónico

Los Libertadores
Fundación Universitaria

Director:
John Petearson Anzola Anzola
Ingeniero Electrónico

Coodirector:
Alexander García Mariaca
Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ, D. C.
2018

Contenido

1	RESUMEN.....	11
2	INTRODUCCION.....	12
3	OBJETIVOS	13
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	13
3.2	OBJETIVO ESPECIFICOS	13
4	JUSTIFICACION	14
5	TRABAJOS REALIZADOS	15
5.1	Definición del Internet de las Cosas IoT.....	15
5.1.1	Ventajas competitivas del Internet de las Cosas IoT.....	17
5.2	Redes de Sensores Inalámbricos (WSN).....	18
5.2.1	Hardware y componentes de un nodo (WSN).....	19
5.2.2	Sistemas de recolección de energía para la alimentación de nodos WSN..	19
5.3	Descripción de NodeMCU v1.0/V3 como nodo WSN.....	21
5.3.1	Versiones de NodeMCU	23
5.3.2	Descripción de Modulo ESP-12E.....	24
5.3.3	Campo de aplicaciones de NodeMCU como nodo WSN	26
5.4	Baterías recargables para nodos WSN.....	28
5.5	Sistemas de conmutación de baterías recargables y paneles solares	30
5.6	APIs para el Internet de las cosas	32
5.6.1	ThingSpeak	32
6	MARCO TEORICO	34
6.1	La energía solar.....	34
6.1.1	Radiación solar.....	34
6.1.2	Efecto fotoeléctrico	36
6.2	Paneles solares fotovoltaicos	37
6.2.1	Tipos de paneles solares fotovoltaicos	37
6.2.2	Curva I-V	38
6.2.3	Parámetros de un panel solar fotovoltaico.....	38
6.2.4	Modelamiento matemático de una celda solar	40
6.3	Dispositivo de almacenamiento de la energía.....	41

6.3.1	Baterías eléctricas	41
6.3.2	Baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH)	45
6.3.3	Supercapacitores.....	47
6.4	Regulador de voltaje.....	50
6.4.1	Requerimientos de un regulador.....	50
6.4.2	Reguladores integrados lineales.....	50
6.5	Diodo.....	52
6.5.1	Condiciones de polarización inversa ($V_d < 0$)	53
6.5.2	Condición de polarización directa ($V_d > 0$)	53
6.5.3	Diodo Schottky o diodo de barrera.....	54
6.6	Sensores para aplicaciones en redes WSN.....	55
6.6.1	Sensor de temperatura y humedad DHT22 (AM2302)	56
6.7	Ciclo de trabajo (duty cycle) de un nodo WSN.....	57
7	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	58
7.1	Costo de un nodo WSN	58
7.2	Energía de un nodo WSN.....	58
8	METODOLOGIA.....	59
9	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	63
10	ANALISIS DE RESULTADOS.....	64
10.1	Calculo de la energía.....	64
10.1.1	Calculo de la energía que consume el NodeMCU v1.0/V3	64
10.1.2	Calculo de la energía suministrada por las baterías	65
10.1.3	Calculo de la energía proporcionada por el panel solar	66
10.1.4	Calculo de energía del NodeMCU en modo sleep	69
10.1.5	Prueba Experimental del sistema de recolección de energía solar para la autonomía energética del NodeMCU	71
10.1.6	Análisis de curva de carga y descargas de baterías Ni-MH	73
10.1.7	Aplicabilidad de NodeMCU como nodo en una red WSN.	74
10.1.8	Control de carga por software.....	76
11	CONCLUSIONES	77
12	BIBLIOGRAFIA	78
13	ANEXOS.....	82
13.1	Resultados de circuitos de conmutación con baterías Ni-MH y supercapacitores	82

13.1.1	Calculo de la energía almacenada por el supercapacitor.....	82
13.1.2	Calculo de la energía proporcionada por las baterías Ni-MH.....	83
13.1.3	Resultados de sistemas de conmutación de baterías y supercapacitores...	84



Los Libertadores
Fundación Universitaria

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Pronóstico del uso de IoT en las Industrias para el 2020 por sectores.....	16
Figura 2 Diagrama de Bloques de Nodo Sensor. Fuente: José Rafael Lajara Vizcaino “Modelado y optimización de energía en redes de sensores inalámbricos para la medida de parámetros medioambientales”, Tesis Doctoral, 2014, p. 1.....	19
Figura 3 Partes de un NodeMCU	22
Figura 4 NodeMCU V3 Lolin. Fuente:(Shkurti, 2017)	22
Figura 5 Versiones de NodeMCU. Fuente: (Hernández, n.d.)	23
Figura 6 Diagrama de Bloques ESP-12E.Fuente:(ESP12-E Datasheet, 2015)	24
Figura 7 Diagrama de bloques de sistema de recolección de energía solar para nodo WSN. Fuente: (Chien et al., 2016)	30
Figura 8 Diagrama de bloques de un sistema de recolección de energía para nodo WSN (Senivasan et al., 2017)	31
Figura 9 Interfaz gráfica de plataforma ThingSpeak. Fuente: https://thingspeak.com/	33
Figura 10 Modelo P-N.....	37
Figura 11 Curva I-V fuente: (Vargas & Abrahamse, 2014)	38
Figura 12 Modelo circuital de una celda solar. Fuente: (Saucedo García, 2010).....	40
Figura 13 Elementos de una celda recargable. Fuente: (Viera Pérez, 2003)	42
Figura 14 Curva de descarga de baterías NM15. Fuente:(Manual, 2010)	46
Figura 15 Curva de carga de baterías NM15. Fuente:(Manual, 2010).....	46
Figura 16 Energía y potencia específica para distintos de tipos de almacenamiento de energía. Fuente: (Halper & Ellenbogen, 2006)	48
Figura 17 Circuito equivalente de un supercapacitor. Fuente:(Rodr & Fonseca, 2015)	49
Figura 18 Regulador de voltaje de tres terminales. Fuente:(“Reguladores de voltaje de circuito integrado,” n.d.)	51
Figura 19 Pines de regulador MCP 1700. Fuente: https://randomnerdtutorials.com/esp8266-voltage-regulator-lipo-and-li-ion-batteries	51
Figura 20 Diodo Ideal. Fuente :(L Boylestad & Nashelsky, 1997).....	53
Figura 21 Región de agotamiento. Fuente: http://www.geocities.ws/pnavar2/semicon/tipos.html	53
Figura 22 Símbolo electrónico del diodo Schottky. Fuente: (Sanchez, n.d.).....	54
Figura 23 Curva característica del diodo Schottky comparada con un diodo de unión p-n de Si. Fuente:(Sanchez, n.d.)	55
Figura 24 Sensor DHT22	56
Figura 25 Ciclo de trabajo típico de un nodo WSN. Fuente: (Naveen & Manjunath, 2011)57	57
Figura 26 Esquemático de circuito de conmutación de baterías y supercapacitor.....	59
Figura 27 Medición de corriente de NodeMCU. Fuente: autor	60
Figura 28 Medición de corriente de NodeMCU. Fuente: autor	60
Figura 29 Esquemático del sistema de recolección de energía.....	62
Figura 30 Montaje experimental del sistema de recolección de energía a NodeMCU. Fuente: autor.	62
Figura 31 Valor medio de corriente que consume el NodeMCU en modo activo.....	64
Figura 32 Pulsos que genera el NodeMCU en modo activo	65

Figura 33 Curva de descarga de baterías Ni-MH al alimentar el NodeMCU en modo activo	66
Figura 34 Curva I-V del panel solar en un día lluvioso registrado a las 12:00 pm.	67
Figura 35 Curva I-V del panel solar en un día nublado registrado a las 4:00 pm.....	67
Figura 36 Configuración de NodeMCU en modo sleep. Fuente: Autor	69
Figura 37 Valor medio de corriente de NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%.....	70
Figura 38 Descarga de batería Ni-MH con un ciclo de trabajo de 37.5%	71
Figura 39 Voltaje de las baterías durante el experimento los primeros 3 días.....	72
Figura 40 Voltaje de las baterías Ni-MH durante el experimento	72
Figura 41 Voltaje de las baterías Ni-MH con una frecuencia de muestreo de 24h	73
Figura 42 Curva de carga de baterías Ni-MH.....	73
Figura 43 Curva de descarga de baterías Ni-MH	74
Figura 44 Esquemático de sistema de recolección de energía y sensor de humedad.....	75
Figura 45 Prototipo de nodo WSN alimentado con un sistema de recolección de energía.	75
Figura 46 Descarga de supercapacitor de 50F alimentando al NodeMCU	83
Figura 47 Descarga de baterías Ni-MH alimentando al NodeMCU.	84
Figura 48 Descarga de baterías Ni-MH en sistema de conmutación con supercapacitores	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Fuentes de energía ambiental. Fuente: (Lee et al., 2016).	20
Tabla 2 Parámetros Wi-Fi ESP-12E. Fuente:(ESP8266 Datasheet, 2015).....	24
Tabla 3 Parámetros eléctricos de funcionamiento del NodeMCU. Fuente: (ESP8266 Datasheet, 2015)	26
Tabla 4 Parámetros eléctricos en distintos modos de operación del NodeMCU. Fuente: (ESP8266 Datasheet, 2015)	26
Tabla 5 Ventajas y desventajas de diferentes tipos de baterías. Fuente:(Chien et al., 2016)	28
Tabla 6 Propiedades de baterías recargables (Senivasan et al., 2017)	28
Tabla 7 Comportamiento horario de la irradiación global horizontal en la ciudad de Bogotá. Fuente: http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html	36
Tabla 8 Características de LDO MCP1700. Fuente:(Description & Description, 2007).....	52
Tabla 9 Especificaciones técnicas del sensor DHT22.Fuente:(DHT22, 2015).....	56
Tabla 10 Características técnicas dadas por el fabricante. Fuente: https://www.ebay.com/itm/Solar-Charger	67
Tabla 11 Valores obtenidos a las 8:00 am	68
Tabla 12 Valores obtenidos a las 12:00 pm	68
Tabla 13 Valores obtenidos a las 3:30 pm	68
Tabla 14 Valores de consumo en distintos ciclos de trabajo	70

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Radiación total.....	35
Ecuación 2 Punto de potencia máxima	39
Ecuación 3 Factor de forma FF.....	39
Ecuación 4 Eficiencia.....	39
Ecuación 5 Corriente del diodo	40
Ecuación 6.....	40
Ecuación 7 Ecuación característica de una celda solar.....	41
Ecuación 8 Voltaje	43
Ecuación 9 Corriente eléctrica	43
Ecuación 10 Capacidad de una batería	44
11 Índice C	44
Ecuación 12 Conversión de Watios a Joules	44
13 Energía disponible en un supercapacitor ideal.....	48
14 Energía utilizable por los supercapacitores	48
15 Calculo de resistencia EPR.....	49
16 Calculo de resistencia ESR.....	49
Ecuación 17 Ecuación característica del diodo.	54
Ecuación 18 Ciclo de trabajo nodo WSN	57
Ecuación 19 Ley de Ohm.....	61
Ecuación 20 Potencia de consumo NodeMCU.....	65
Ecuación 21 Consumo de energía de NodeMCU durante 1 día.....	65
Ecuación 22 Energía que suministran las baterías Ni-MH	65
Ecuación 23 Tiempo que dura la batería alimentando al NodeMCU a un ciclo de trabajo del 100%	65
Ecuación 24 Energía entregado por el panel solar durante 1 día.....	68
Ecuación 25 Tiempo que dura el panel solar en cargar las baterías	68
Ecuación 26 Ciclo útil de funcionamiento del NodeMCU.....	70
Ecuación 27 Potencia de consumo de NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%	70
Ecuación 28 Energía de consumo del NodeMCU durante 1 día a un ciclo de trabajo de 37.5%	70
Ecuación 29 Tiempo de duración de la batería alimentando al NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%.....	71



Los Libertadores
Fundación Universitaria

GLOSARIO

WSN (Wireless Sensor Network): Es una red de nodos sensores distribuidos en una aerea geográfica, que monitorean algún parámetro físico o ambiental y se comunican entre ellos de manera inalámbrica creando una red descentralizada de tipo Ad hoc.

IoT (Internet of Things): El Internet de las cosas es un concepto que define una nueva era tecnológica que está viviendo el mundo y se refiere a la interconexión de todos los objetos y cosas a internet para mejorar la forma en que vivimos, nos relacionamos, jugamos y trabajamos.

Redes Ad Hoc: Es una red inalámbrica descentralizada de nodos que se comunican entre sí para crear una ruta de transmisión y recepción de datos dependiendo del enlace de red que exista entre ellos sin la necesidad de routers o puntos de acceso para su conectividad.

Ni-MH: Las baterías Ni-MH (Níquel-hidruro metálico), es un tipo de batería recargable que utiliza un ánodo de oxidróxido de níquel y su cátodo es de una aleación de hidruro metálico.

Isc: La corriente de corto circuito es la máxima corriente que entrega un panel solar fotovoltaico cuando el voltaje en sus terminales es cero.

Voc: El voltaje en circuito abierto es el máximo voltaje entregado por el panel solar cuando la corriente entre sus terminales es cero.

Conmutación: Es una conexión que se establece para permitir la comunicación entre dos o más nodos en un circuito.

NodeMCU: Es un kit de desarrollo open hardware y firmware de código abierto que tiene incorporado un módulo Wi-Fi ESP-12E ideal para aplicaciones en IoT y puede ser programado a través de ID de arduino o por medio del lenguaje LUA.

Fotoeléctrico: Es el fenómeno por medio del cual las partículas de luz llamadas fotones impactan contra los electrones de un metal sacándolos de la órbita de sus átomos efecto que produce una corriente eléctrica.

APIs: Por sus siglas en inglés (Application Programming Interface), es un conjunto de protocolos, comandos, funciones y herramientas informáticas que permite la comunicación y el intercambio de información entre aplicaciones.

Ciclo de trabajo: Es la relación que existe entre el periodo en que la señal está en modo activo y el periodo total.

Potencia: Es la cantidad de trabajo que puede realizarse en una cantidad específica de tiempo. Su unidad es 1Joule/segundo.

Energía: Es la cantidad de potencia utilizada en un determinado tiempo.

1 RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño de un sistema de recolección de energía de bajo costo, con un panel solar fotovoltaico (tipo monocristalino) y baterías recargables Ni-MH para lograr la autonomía energética de una placa NodeMCU v1.0/V3, dispositivo que es ideal para aplicaciones en redes WSN, ya que cuenta con un módulo Wi-Fi ESP-12E, para la comunicación inalámbrica con otros nodos.

Por medio de instrumentos de medición como osciloscopios y multímetros se determina la corriente promedio con la que funciona el NodeMCU y con este valor se realizó el diseño del sistema de recolección de energía con el panel solar y baterías Ni-MH.

Tras varias pruebas de funcionamiento se obtuvieron resultados exitosos al lograr el funcionamiento continuo (auto sostenible) del NodeMCU, para su uso en múltiples aplicaciones de IoT (Internet of Things).



Los Libertadores
Fundación Universitaria

2 INTRODUCCION

Una de las tecnologías más importantes que se están investigando y desarrollando actualmente a nivel mundial en el Internet de las cosas (en inglés, Internet of Things, abreviadamente IoT), son las redes de sensores inalámbricos (en inglés, Wireless Sensor Networks, abreviadamente WSN), las cuales consisten en pequeños módulos o nodos que se pueden comunicar entre ellos de manera inalámbrica formando una red de comunicación con el fin de monitorear algún parámetro físico del ambiente por medio de sensores y enviar esos datos a un servidor conectado a internet.

Cada nodo se compone de un transmisor/receptor inalámbrico, un microcontrolador, sensores, y un sistema de energía compuesto normalmente por baterías.

A la hora de implementar esta tecnología hay dos aspectos muy importantes que considerar:

- La energía que consume el nodo
- El costo del nodo

Una de las líneas de mayor investigación es el de la eficiencia energética de los nodos (On, Wireless, & Networks, 2014), sobre este tema hay muchos artículos de investigación en los que se busca mejorar el consumo de energía de estos nodos (Tubiello, Poehls, Webber, Marcon, & Vargas, 2018), como por ejemplo, algoritmos de enrutamiento (Bruneo, Scarpa, Bobbio, Cerotti, & Gribaudo, 2010), control de ciclos de trabajo (Léone, Leguay, Medagliani, & Chaudet, 2015), diseño de nuevas topologías (Liang, Zhang, & Li, 2013), protocolos de comunicación de datos (Shwe, Han, & Chong, 2015), también se han realizado investigaciones en la búsqueda de fuentes alternas de energía como es la energía solar para alargar el ciclo de funcionamiento de estos dispositivos.

Otro tema muy importante es el costo de cada dispositivo ya que si implementamos una gran cantidad de estos nodos en un área extensa un costo elevado de cada nodo puede provocar que el proyecto no sea viable financieramente.

Es por ello que en este proyecto escogimos el NodeMCU v1.0/V3 (módulo ESP-12E), ya que es una placa muy económica en el mercado actual, ya que cada dispositivo tiene un costo en promedio de alrededor de unos 8 dólares ("NodeMCU," n.d.), el dispositivo cuenta con microcontrolador que puede ser programado utilizando el IDE de arduino lo que lo hace muy fácil de utilizar.

En este documento se realiza la caracterización de este dispositivo para observar cómo se comporta en términos energéticos, y establecer si es viable o no su uso en una red de sensores inalámbricos al implementarlo junto a un sistema de recolección de energía solar para mejorar su ciclo útil.

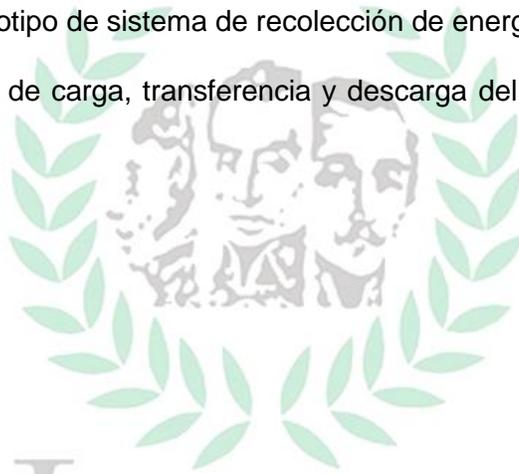
3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de recolección de energía de bajo costo, con un panel solar (tipo monocristalinos) y baterías recargables de Ni-MH que permita la autonomía energética de un nodo en una red de sensores inalámbricos.

3.2 OBJETIVO ESPECIFICOS

- Diseñar un prototipo de sistema de recolección de energía fotovoltaica y baterías recargables.
- Analizar curvas de carga, transferencia y descarga del sistema de recolección de energía.

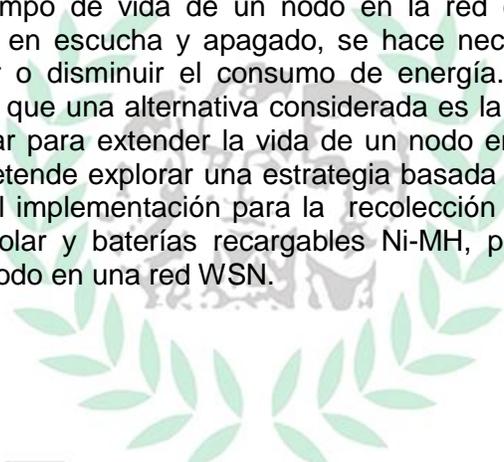


Los Libertadores
Fundación Universitaria

4 JUSTIFICACION

En la instalación de una red de sensores inalámbricos WSN para aplicaciones que requieren su ubicación en zonas geográficas de difícil acceso, se tiene que tener en cuenta que los nodos normalmente están alimentados por baterías alcalinas con un ciclo de vida muy corto, lo que dificulta el remplazo de estas en este tipo de lugares y también el costo adicional de la mano de obra al realizar este tipo de trabajo.

Una red de sensores inalámbrica consume energía al realizar actividades como: medición, procesamiento y comunicación. El consumo asociado a las tareas de comunicación entre los nodos se consideró la principal causa de agotamiento de la energía. Por este motivo, para el análisis del tiempo de vida de un nodo en la red en sus diferentes estados: transmisión, recepción, en escucha y apagado, se hace necesario establecer cualquier estrategia para ahorrar o disminuir el consumo de energía. Para ello, en la literatura consultada se deja ver, que una alternativa considerada es la recolección de energía por medio de un panel solar para extender la vida de un nodo en la red, por lo tanto, en el presente trabajo, se pretende explorar una estrategia basada en el diseño de un sistema de bajo costo y de fácil implementación para la recolección de energía fotovoltaica por medio de un panel solar y baterías recargables Ni-MH, para extender el tiempo de funcionamiento de un nodo en una red WSN.



Los Libertadores
Fundación Universitaria

5 TRABAJOS REALIZADOS

5.1 Definición del Internet de las Cosas IoT

El IoT, es un concepto que surgió gracias a Kevin Ashton cofundador del grupo de investigación Auto – ID Center del Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT), este grupo de investigación fundado en el año 1999 se encargaba de investigaciones en el campo de la identificación por Radiofrecuencia en red (RFID) y el uso de sensores (Evans, 2011).

Después de una presentación que hizo para Procter y Gamble (P&G) en 1999 Kevin Ashton acuñó este término por la importancia que tenía internet en estos tiempos y quería llamar la atención de los ejecutivos de la compañía con un proyecto de identificación por radiofrecuencia (en inglés, Radio Frequency Identification, abreviadamente, RFID) que tenía para la compañía, sin saber que años después este concepto iba a ser una nueva revolución tecnológica en el mundo.

En un artículo publicado por Kevin Ashton el 22 de junio de 2009 para la revista RFID Journal Kevin dice: *“el internet actual y en si todos los ordenadores son totalmente dependientes de los seres humanos para la búsqueda y el manejo de la información, pero si todos los equipos por si mismos recopilaran información sobre las cosas, es decir recopilaran todos los datos con la ayuda de RFID y sensores, que permita a las computadoras detectar, observar, identificar y comprender el mundo sin las limitaciones de los datos introducidos por los seres humanos sería la próxima revolución tecnológica más importante que la invención del propio internet”*.(Ashton, 2009).

La IoT es la posibilidad de conectar dispositivos de manera inalámbrica entre si los cuales puedan registrar por medio de sensores algún tipo de parámetro físico, ambiental, químico entre muchos otros y poder enviar estos datos a nube para que estos sean analizados por computadoras que brinden información detallada sobre el comportamiento de cualquier sistema que deseemos monitorear en tiempo real.

Esta tecnología tendrá un impacto técnico, social y económico ya que los objetos con los que interactuamos a diario tendrán la posibilidad de conectarse a internet y por medio de poderosos sistemas analíticos de datos esta información transforme la forma en que trabajamos, vivimos y jugamos.

Se espera que en 2025 haya 100 mil millones de dispositivos conectados y un impacto económico global por más de 11 billones de dólares (Rose, Eldridge, & Chapin, 2015).

Según la empresa consultora y de investigación de tecnología Gartner que tiene su sede en Stamford, Estados Unidos, para el 2020 habrá 50 mil millones de dispositivos conectados, el internet de las cosas creara oportunidades y desafíos sin precedentes en cada una de las industrias a nivel mundial (Geschickter & R. Moyer, 2016).

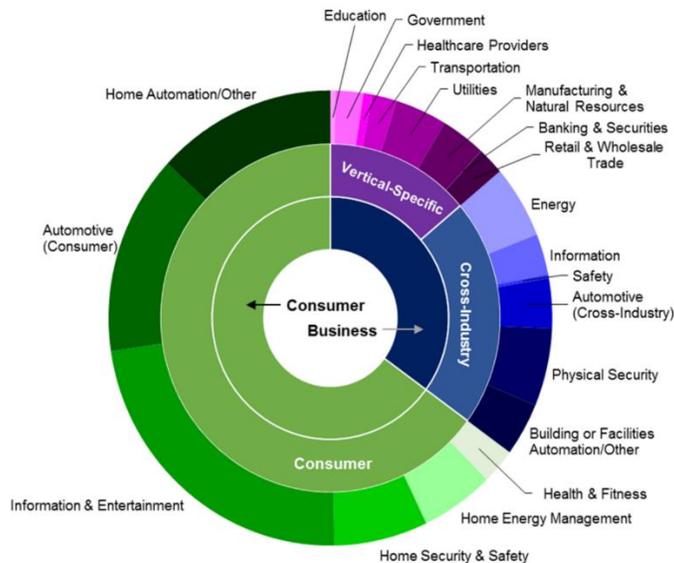


Figura 1 Pronóstico del uso de IoT en las Industrias para el 2020 por sectores.

Fuente: (Gartner, 2016)

En una encuesta realizada por Gartner en el 2016 en varios sectores industriales el 50% de los encuestados dijo que planean integrarse o utilizar datos obtenidos por sensores de terceros.

Ejemplos de caso de uso podría ser aseguradoras de automóviles que deseen acceder a los datos de telemática vehicular, o también en la administración de la energía domiciliar, para ofrecer descuentos o rebajas por reducir el consumo de energía en periodos de demanda máxima.

La encuesta también determinó que el 29% de las organizaciones ya han implementado el IoT y que el otro 14 % está planeando implementarlo.

Mejorar la experiencia del cliente será el beneficio que más busquen las empresas en el futuro lo que hace que implementar la IoT se convierta en una ventaja competitiva en el Mercado (Geschickter & Tully, 2016).

Hay tres factores que en los últimos años han contribuido a incrementar el uso de IoT en las industrias y aprovechar al máximo todo su potencial que son principalmente las siguientes según la firma Gartner (Geschickter & R. Moyer, 2016):

- Costo de conectividad y equipos electrónicos con tecnología inalámbrica integrada
- Aplicabilidad
- Acceso a la información

Cada día podemos encontrar una gran variedad de módulos electrónicos con conexión inalámbrica por medio de Wi-Fi, bluetooth, NFC (Near Field Communication) y redes móviles, los cuales pueden manejar grandes volúmenes de información a un costo de conexión muy asequible para cualquier persona e industria.

Según el señor Janus Bryzek conocido como el “padre de los sensores” (Vicepresidente de Fairchild Semiconductor), menciona algunos de los factores que ha promovido el uso y el interés en IoT, en primer lugar está la nueva versión del protocolo IPv6 la cual es una tecnología que permite una cantidad casi ilimitada de dispositivos conectados a la red, otro factor comenta el señor Brysek es que los cuatro proveedores principales de redes : Cisco, IBM, GE, Amazon han apoyado el desarrollo de IoT facilitando nuevas tecnologías que están al alcance de cualquier empresa.

El señor Bryzek menciona algunos pronósticos financieros que tienen que ver con el desarrollo de IoT en el mundo como por ejemplo menciona que en los próximos veinte años el IoT aplicado a las industrias aumentaría el PIB global alrededor de unos 10 a 15 billones de dólares.

También la empresa de consultoría informática Gartner estima que las empresas proveedoras de productos y servicios de IoT generaran ingresos incrementales por 300 mil millones de dólares para el 2020 (Press, 2014).

El avance de la tecnología en temas como la inteligencia artificial, vehículos autónomos, la domótica y la automatización en muchos procesos Industriales han contribuido en necesitar del uso de internet de las cosas para monitorear, registrar y controlar en tiempo real, el comportamiento y los resultados de nuevas tecnologías con ayuda de sensores.

Y por último otro de los factores que contribuye al incremento en el uso de internet de las cosas en las industrias y en los hogares es la información, tener acceso de manera inmediata a cualquier tipo de dato registrado por sensores que monitorea algún sistema en específico permite que estos datos sean analizados y se conviertan en información que ayude a conocer mejor el comportamiento del sistema (Geschickter & R. Moyer, 2016).

5.1.1 Ventajas competitivas del Internet de las Cosas IoT

Las empresas que se están abriendo campo en el negocio digital pueden mejorar la interacción con sus clientes finales utilizando en sus productos y servicios la tecnología IoT que permita identificar rápidamente las necesidades de sus clientes para brindarles una rápida solución.

Una vez que las empresas empiecen a implementar IoT esto tendrá un impacto positivo sobre ellas, ya que es posible aumentar los ingresos y disminuir los costos de producción, ya que por medio de esta tecnología es posible mejorar las operaciones, supervisar de una manera más detallada las distintas etapas de un proceso de producción, conserva los recursos, mejora la administración de riesgos y fortalece la seguridad.

Para los usuarios finales también habrá un impacto positivo, ya que mejora la experiencia del cliente, en cuanto a la rapidez en la entrega del producto y en la calidad de este ya que en muchos casos la aplicación de IoT por parte de las industrias puede disminuir en grandes proporciones los errores humanos en la etapa de producción.

5.2 Redes de Sensores Inalámbricos (WSN)

Dentro del mundo de IoT se está abriendo paso una tecnología muy interesante a nivel mundial llamada red de sensores inalámbricos (en inglés Wireless Sensor Network, abreviadamente WSN), estas redes están conformadas por pequeños dispositivos o nodos sensores, que se pueden comunicar entre sí de manera inalámbrica, cada nodo sensor están formados por un mecanismo transceptor inalámbrico, una unidad de procesamiento, por lo general, un microcontrolador, sensores o actuadores y un sistema de energía para su alimentación, comprendido normalmente por batería, estos dispositivos tienen la capacidad de monitorear condiciones físicas del medio ambiente como la intensidad de la luz, temperatura, humedad, la presión, datos químicos, entre muchos otros factores.

Estos dispositivos se distribuyen físicamente en un área en la que se requiere monitorear un fenómeno físico de investigación, estos al censar los parámetros de interés por medio de sensores, van retransmitiendo inalámbricamente la información a los nodos más cercanos a través de enrutamiento multihop, hasta una estación base que puede ser un ordenador común, el cual procesa la información, la almacena y puede establecer señales de alerta o de control dependiendo del estudio que se esté realizando.

Sus principales aplicaciones son en áreas de medio ambiente, donde se puede monitorear por ejemplo, la actividad sísmica de un volcán activo, prevención de terremotos, detección de incendios forestales, para la agricultura, prevención de plagas, riego de cultivos, monitoreo de los océanos, en domótica control de temperatura, sistema de seguridad contra intrusos y en salud, se puede monitorear diferentes aspectos físicos de pacientes con enfermedades que requieren una supervisión permanente, otras áreas de uso de esta red son en la industria y vehículos, aplicaciones militares y entornos de alta seguridad.

5.2.1 Hardware y componentes de un nodo (WSN)

Un nodo sensor está conformado por un microcontrolador, sensores y actuadores, un transceptor (transmisor y receptor inalámbrico), un sistema de energía que puede ser baterías u otra fuente de energía renovable.

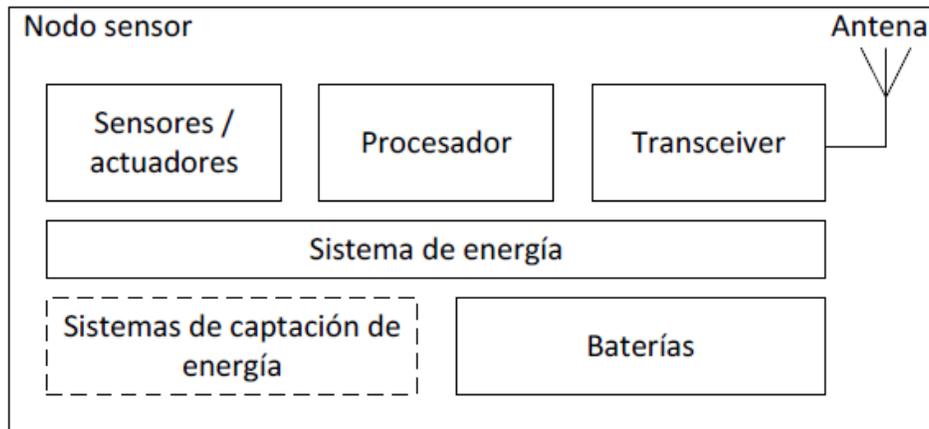


Figura 2 Diagrama de Bloques de Nodo Sensor. Fuente: José Rafael Lajara Vizcaino "Modelado y optimización de energía en redes de sensores inalámbricos para la medida de parámetros medioambientales", Tesis Doctoral, 2014, p. 1

En este trabajo se realiza el diseño de un sistema de recolección de energía por medio de un panel solar y baterías recargables para prolongar la vida útil de un nodo en una red de sensores inalámbricos permitiendo un mayor tiempo de funcionamiento de estos dispositivos.

Esto permitirá reducir los costos de implementación de esta tecnología ya que en muchas ocasiones estas redes de sensores son distribuidas en zonas geográficas de difícil acceso y por lo general utilizan baterías alcalinas para su funcionamiento que duran pocos meses dependiendo de la frecuencia de muestreo de los parámetros que se están monitoreando, así que resulta muy difícil estar cambiando las baterías de estos dispositivos continuamente.

5.2.2 Sistemas de recolección de energía para la alimentación de nodos WSN

En la actualidad hay pocos artículos científicos sobre sistemas de recolección de energía del ambiente o energía limpia para la alimentación de nodos de una red de sensores inalámbricos WSN, es muy importante mencionar que no solo los diseños e investigaciones que se han realizado de este tema, se basan en recolección de la energía solar, también se han implementado otros métodos de recolección de energía ambiente para la alimentación de nodos los cuales se describen en la tabla 1 juntos con sus densidades de potencia (Lee, Blaauw, & Sylvester, 2016).

Fuente de Energía	Densidad de Potencia
Luz	100mW/cm ² (sol directo) 100μW/cm ² (oficina iluminada)
Ruido Acústico	0.003μW/cm ³ a 75 dB 0.96μW/cm ³ a 100 dB
Variación de Temperatura	10μW/cm ³
Radiofrecuencia (RF)	1μW/cm ²
Vibración (micro generador)	4μW/cm ³ (movimiento humano-Hz) 800 μW/cm ³ (maquina-kHz)
Vibración (piezoeléctrica)	200μW/cm ³
Viento	1μW/cm ²
Termoeléctrica	60 μW/cm ²

Tabla 1 Fuentes de energía ambiental. Fuente: (Lee et al., 2016).

Como podemos observar en la tabla 1, la energía solar es la que mayor densidad de potencia nos ofrece en aplicaciones al aire libre comparado con otras formas de recolección de energía, y también es la más abundante en nuestro país, por ello en este trabajo hemos escogido la energía solar como fuente de energía para la alimentación de un nodo WSN.

Un sistema de recolección de energía se compone de dos elementos esenciales(Naveen & Manjunath, 2011):

- Unidad de recolección de energía
- Un módulo de almacenamiento de energía

En muchos de los diseños de sistemas de recolección de energía utilizan sistemas híbridos de conmutación de baterías y supercapacitores como módulos de almacenamiento de la energía, los supercapacitores a diferencia de un condensador electrolítico convencional tienen una mayor capacitancia y mayor densidad de potencia, también tienen ciclos de carga y descarga muy superiores que las baterías recargables entre 500.000 a 1.000.000 ciclos, lo que permite que estos dispositivos sean ideales para trabajar en conjunto con las baterías para el almacenamiento de la energía, pero también presentan algunas desventajas con respecto a las baterías como son mayor corriente de fuga, gran tamaño y un mayor costo a la hora de implementar el sistema, lo que no las hace viable para este proyecto.

Por lo general los diseños de conmutación de baterías y supercapacitores funcionan de la siguiente manera, por ejemplo, en un sistema de recolección de energía solar los supercapacitores almacenan la energía y alimentan al nodo en momentos de sol y cuando los supercapacitores no tienen la suficiente energía para alimentar al nodo conmutan a las baterías para que estas sean la fuente principal de esta forma los supercapacitores ayudan a prolongar la vida útil de las baterías.

En el artículo (Mouapi, Hakem, Kandil, & Kamani, 2016) se propone un sistema de recolección de energía, para la alimentación de nodos WSN que monitorean el consumo de combustible de una flota de trenes por medio de vibración mecánica del mismo tren.

En otro artículo de investigación (Nayak, Prakash, & Rao, 2014) los autores plantean un sistema de recolección de energía eólica para la alimentación de nodos sensores para monitorear un cultivo.

Las estructuras de ingeniería complejas hacen parte del desarrollo de cualquier sociedad, es por ello que un buen sistema de control de salud estructural (SHM), es muy importante para la detección de daños en este tipo de obras.

Al detectar anticipadamente daños estructurales de mega obras se pueden corregir estas fallas evitando tragedias.

Gracias a la tecnología WSN se pueden monitorear distintas estructuras de ingeniería como son: edificios, puentes, caminos, tuberías, represas, ferrocarriles, aviones, barcos, naves espaciales entre otros, pero el inconveniente que presenta la tecnología WSN, es precisamente en cuanto al tema energético.

Es muy complejo acceder a los nodos sensores ubicados en este tipo de mega estructuras para el cambio de baterías continuamente, en un artículo de investigación (Lee et al., 2016) los autores describen distintos modelos de recolección de energía ambiental para redes WSN que monitorean mega estructuras, como por ejemplo un nodo sensor ubicado en los cables colgantes de puentes se alimenta mediante un sistema de recolección de energía de vibración de estos mismos cables.

5.3 Descripción de NodeMCU v1.0/V3 como nodo WSN

En este proyecto utilizamos un NodeMCU v1.0/V3 (Modulo ESP-12E), como nodo WSN, ya que este kit de desarrollo cuenta con todas las partes que componen un nodo WSN, como son un microcontrolador, un pin conversor analógico-digital (ADC), pines de entrada y salida de propósito general (en inglés, General Purpose Input/Output, abreviadamente GPIO), para la conexión de sensores y demás periféricos necesarios para la monitorear cualquier parámetro físico, opciones de bajo consumo eléctrico, y un módulo Wi-Fi para la comunicación inalámbrica con otros nodos.

El NodeMCU es un kit de desarrollo open hardware y firmware de código abierto que tiene incorporado un módulo Wi-Fi ESP-12E en forma de un chip SoC (System on a chip) Wi-Fi ESP8266EX fabricado por la empresa Espressif Systems, este kit interactivo, de bajo costo alrededor de 8 dólares en el mercado ("NodeMCU," n.d.), cuenta en el interior con un microcontrolador que puede ser programado utilizando el lenguaje LUA o por medio de IDE de Arduino para desarrollos de proyectos en la industria IoT.



Figura 3 Partes de un NodeMCU

Por su bajo costo y por su versatilidad se dice que es uno de los dispositivos más prometedores para el futuro de IoT (Jaffe, 2016).

El NodeMCU puede ser configurado como punto de acceso (AP) o en modo estación (STA), en este proyecto es configurado como modo estación y se encargará de registrar la tensión de su fuente de energía que en este caso son las baterías Ni-MH recargables por medio de un pin de conversión analógico-digital (en inglés, Analog-to-Digital Converter, abreviadamente, ADC) que tiene incorporado y enviar este dato vía Wi-Fi a la nube para realizar posteriormente un análisis de su comportamiento energético.

En este trabajo la programación del nodo se llevará a cabo por medio del IDE de arduino ya que es más fácil de programar que el lenguaje LUA.

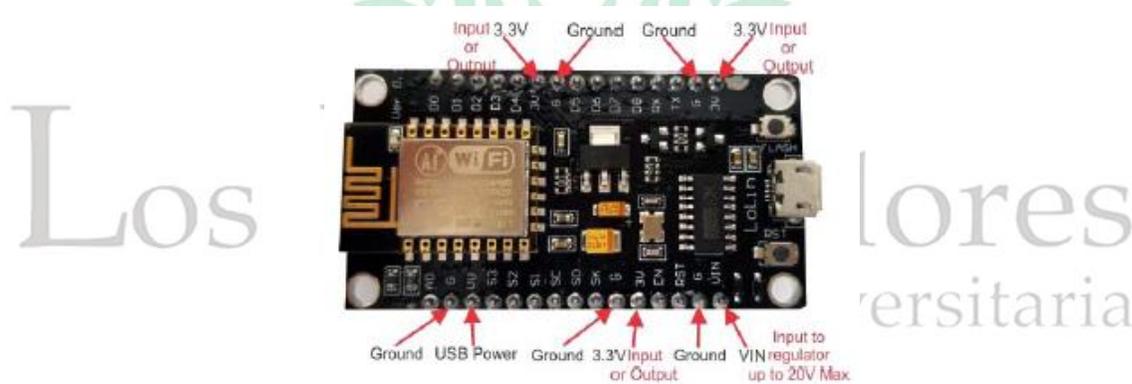


Figura 4 NodeMCU V3 Lolin. Fuente:(Shkurti, 2017)

El Kit de desarrollo NodeMCU está compuesto por:

- Módulo Wi-Fi ESP-12E
- Pines de entrada/salida de propósito general GPIO y de alimentación.
- Leds de estados
- Dos pulsadores Reset y Flash
- Modulo conversor USB-Serial CH340
- Regulador de Tensión AMS1117-3.3V
- Puerto MiniUSB

5.3.1 Versiones de NodeMCU

El NodeMCU es un hardware libre y cualquier empresa puede crear una nueva versión.

Hoy en día existen tres versiones que se diferencian entre ellas por el número de pines y sus funcionalidades.

- NodeMCU V0.9
- NodeMCU v1.0/V2
- NodeMCU v1.0/V3

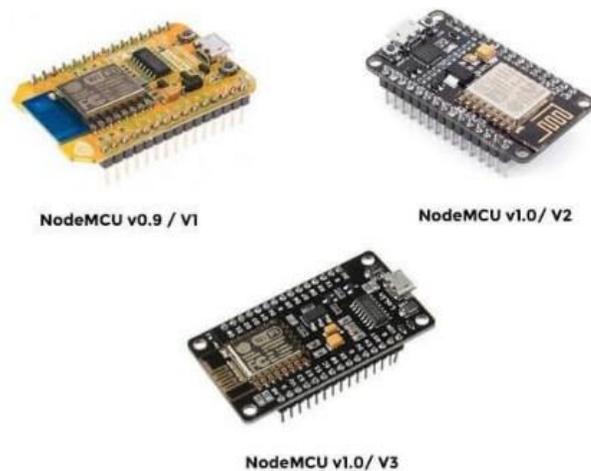


Figura 5 Versiones de NodeMCU. Fuente: (Hernández, n.d.)

Los principales fabricantes de NodeMCU son tres:

- Ámica (distribuidor oficial)
- DOIT
- Lolin/Wemos

En este proyecto utilizamos la versión 3 que hace parte de la segunda generación de NodeMCU fabricada por Lolin, la cual integra el módulo ESP-12E, la primera generación lleva integrado el chip ESP-12.

5.3.2 Descripción de Modulo ESP-12E

El kit de desarrollo NodeMCU v1.0/V3 lleva integrado un módulo Wi-Fi ESP-12E, el cual a su vez cuenta con un chip SoC ESP8266EX que admite el acuerdo estándar IEEE 802.11 b/g/n compatible con toda la pila de protocolo TCP/IP, el chip integra un microcontrolador MCU Tensílica L106 de 32 bits y una velocidad de procesamiento de 80Mhz a 160Mhz (ESP12-E Datasheet, 2015).

El módulo es compatible con protocolos de comunicación UART, HSPI, I2C, I2S Ir remote control, para la comunicación serial con otros dispositivos electrónicos. Tiene una memoria flash de 4MB externa al microcontrolador y una memoria RAM de 50KB.

El chip también integra un convertor analógico digital de 10 bits, con un rango de voltaje de 0 a 1V pero ya que tiene incorporado un divisor de voltaje lo extiende de 0 a 3.3V.

Este pin ADC es una de los de mayor importancia en este proyecto porque es en donde vamos a realizar la conexión del voltaje que está alimentando al nodo para poder visualizar en tiempo real la descarga de la batería.

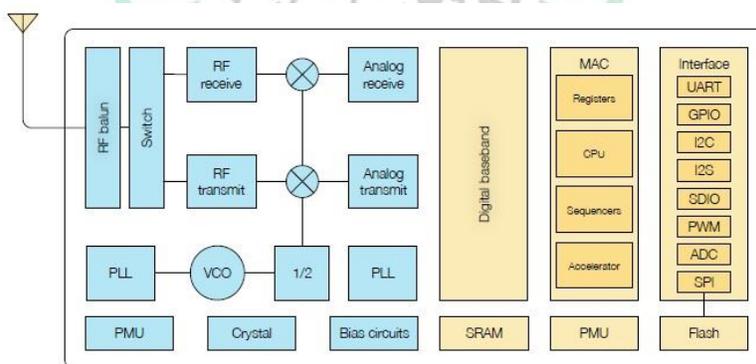


Figura 6 Diagrama de Bloques ESP-12E. Fuente:(ESP12-E Datasheet, 2015)

5.3.2.1 Parámetros de Conexión Wi-Fi del ESP-12E

PARAMETROS WIFI	VALORES
Protocolo Wi-Fi	802.11 b/g/n
Rango de Frecuencia	2.4Ghz-2.5Ghz
Modo Wi-Fi	Station/SoftAP/SoftAP+Station
Seguridad	WPA/WPA2
Encriptación	WEP/TKIP/AES
Protocolos de Red	IPv4, TCP,UDP, HTTP, FTP

Tabla 2 Parámetros Wi-Fi ESP-12E. Fuente:(ESP8266 Datasheet, 2015)

5.3.2.2 Parámetros de Potencia Eléctrica y modos de bajo consumo del ESP-12E

Una de las ventajas del módulo ESP-12E es que cuenta con tecnologías avanzadas y patentadas para lograr un consumo mínimo de energía en diseños para dispositivos móviles, electrónica portátil y Internet de las cosas por medio de tres modos de ahorro de energía(ESP12-E Datasheet, 2015):

- Active Mode
- Sleep Mode
- Deep Sleep Mode

Active Mode: el dispositivo está funcionando normalmente (microcontrolador + transceptor activo).

Mode Sleep: solo el RTC (Real Time Clock) está activo para mantener la sincronización, en este modo la CPU sigue funcionando y mantiene la conexión Wi-Fi sin transmisión de datos para optimizar la potencia de consumo. Este modo se utiliza en aplicaciones que se requiere que la CPU siga funcionando como en PWM o aplicaciones I2S.

Deep Sleep: Solo el RTC (Real Time Clock) está encendido, el resto del chip está apagado en este estado se puede guardar la información de conexión Wi-Fi se suele utilizar para aplicaciones con retrasos de envío o recepción de datos con un tiempo largo, por ejemplo, un sensor de temperatura que lea la temperatura en un intervalo de 100s y duerma 300s.

La función para colocar al NodeMCU en modo Deep Sleep en arduino es la siguiente:

```
ESP.deepSleep (tiempo_en_us, modo_reinicio)
```

Dentro de los parámetros esta:

Tiempo en μs (uint32_t): Es el tiempo en el que el microprocesador está en suspenso.

El tiempo máximo que se puede colocar al microprocesador en suspenso es de aproximadamente 71 minutos y 30 segundos. Esto se debe a que el ESP8266EX integra un procesador Tensílica L106 de 32bits (ESP8266 Datasheet, 2015), por lo tanto el número más alto que admiten es $2^{32} = 4294967296$.

Dado que el tiempo en suspenso se da en microsegundos (μs) tenemos que:

$$4294967296 \mu\text{s} = 4294.967295 \text{ s} = \approx 71' 30''.$$

Modo_reinicio: Este parámetro nos indica la forma en que va a funcionar el NodeMCU al momento en que se reinicia el microprocesador con respecto a la calibración con la señal Wi-Fi.

Existen cuatro métodos:

- WAKE_RF_DEFAULT: cuando se reinicia el microcontrolador solo se calibra la señal de radio si el chequeo da error (init data byte 108>0).
- SLEEP_TIME, WAKE_RFCAL: cuando se reinicia el microcontrolador siempre se calibra la señal de radio. Esto incrementa el consumo.
- SLEEP_TIME, WAKE_NO_RFCAL: cuando se reinicia el microcontrolador no se calibra la señal de radio. Esto reduce el consumo.
- WAKE_RF_DISABLED: cuando se reinicia el microprocesador se deshabilita la señal de radio. Este es el modo con menor consumo, pero no permite ni enviar ni recibir datos vía Wi-Fi.

En las siguientes tablas 3 y 4 se relacionan el voltaje de operación del NodeMCU y algunos otros parámetros de interés que se debe tener en cuenta a la hora de trabajar con este módulo (ESP8266 Datasheet, 2015).

ITEMS	PARAMETROS
Voltaje de Operación	3.0V ~ 3.6V
Corriente de Operación	Valor promedio : 80mA
Rango de Temperatura de Operación	-40° C – 125°C

Tabla 3 Parámetros eléctricos de funcionamiento del NodeMCU. Fuente: (ESP8266 Datasheet, 2015)

MODO	VALOR	UNIDAD
Modo Activo (Transmisión y Recepción)	80	mA
Mode Sleep	15	mA
Mode Deep Sleep	20	µA

Tabla 4 Parámetros eléctricos en distintos modos de operación del NodeMCU. Fuente: (ESP8266 Datasheet, 2015)

5.3.3 Campo de aplicaciones de NodeMCU como nodo WSN

La principal ventaja de NodeMCU en comparación con demás nodos que se encuentran en el mercado, es su precio, este dispositivo es muy económico alrededor de unos 8 dólares, además es muy versátil, su única desventaja es que tiene un consumo un poco más elevado que los demás dispositivos ideales para redes de sensores WSN.

En algunos artículos de investigación podemos encontrar algunas aplicaciones interesantes en donde han utilizado el NodeMCU como dispositivo IoT.

Estos temas de investigación están relacionados al campo médico, redes de sensores inalámbricos WSN, transporte, domótica, entre otros.

También cabe resaltar que su uso en un futuro comprenderá mayores campos de investigación en otras áreas, como agricultura, medio ambiente, automatización de procesos industriales, ya que por su versatilidad, bajo costo, y fácil programación, tiene muchas ventajas comparados con otros dispositivos que encontramos en el mercado actualmente para tales fines.

En el artículo (Škraba et al., 2017), los autores utilizan un NodeMCU y unos sensores PPG para monitorear la frecuencia cardíaca de pacientes que se encuentran hospitalizados por problemas cardíacos, este registro de frecuencia pueden ser visualizados desde un monitor, tablet o smartphone, con el fin de alertar anticipadamente cualquier anomalía a los médicos de turno o incluso al mismo paciente.

En el artículo (Prinyakupt & Yootho, 2017), relacionado con salud ocupacional, los autores realizaron una investigación para medir la temperatura en tiempo real de los trabajadores utilizando NodeMCU y sensores de temperatura DS18B20 y enviar los datos a la plataforma ThingSpeak que es una plataforma IoT, donde es posible acceder desde cualquier smartphone, tablet para el análisis de los datos.

En (Shkurti, 2017), se utiliza un NodeMCU como nodo de una red de sensores inalámbricos WSN para un sistema de monitoreo ambiental de temperatura y humedad ambiente para detectar cuando estos parámetros están por fuera de ciertos límites que conllevan a problemas de salud en niños y ancianos en Kosovo, aquí podemos apreciar el interés que está tomando la implementación de NodeMCU en distintos proyectos WSN, y la importancia de ir mirando soluciones energéticas para la autonomía de estos dispositivos en proyectos ambientales en los que se enfocan los autores.

También podemos observar en el artículo (Kodali & Mandal, 2016) el diseño de una estación meteorológica utilizando NodeMCU como cerebro para medir la humedad, la temperatura, presión, intensidad de la luz, de un determinado lugar o habitación y por medio de un mensaje de texto, un correo electrónico, o un mensaje en twitter, alertar al usuario del sistema sobre las condiciones del ambiente en tiempo real.

El código del proyecto está programado por medio de arduino IDE.

Una investigación interesante que realizaron los científicos autores del artículo, para medir y monitorear el voltaje producido por una red de células solares que sirve de energía alternativa para un cultivo de hongos por medio de sensores de voltajes conectados a NodeMCU los datos se pueden visualizar desde cualquier smartphone que esté conectado a la web.

Para un sistema inteligente de transporte se realizó el diseño de un sistema de seguimiento de autobuses en un campus universitario (Charoenporn et al., 2016), los investigadores realizaron una comparación de varios dispositivos para establecer qué tipo de tecnología es mejor en cuanto a eficiencia energética y envió de los datos para este sistema en particular.

Se comparó un sistema con microcontrolador arduino uno y arduino mega junto al ESP-01 que es una de las primeras versiones de integración del chip ESP8266, modulo bluetooth y NodeMCU.

Se estableció por parte de los resultados de la investigación que el NodeMCU era mejor que otros dispositivos por una conexión más estable, y mayor envió de datos.

5.4 Baterías recargables para nodos WSN

En un sistema de recolección de energía solar para la alimentación de un nodo WSN se necesita un sistema de almacenamiento de la energía si se requiere que el dispositivo funcione sin interrupción.

Las baterías recargables son con mayor frecuencia la elección para el almacenamiento de la energía solar debido a su alta densidad de energía.

Existen cinco tipos de baterías recargables en el mercado actual níquel cadmio, níquel hidruro metálico, ácido de plomo sellado, iones de litio, iones de litio poliméricos.

En el artículo (Chien, Drieberg, Sebastian, & Hiung, 2016) se mencionan algunas ventajas y desventajas de tres tipos de baterías recargables los cuales han sido definidos en la tabla 5.

Tipo de Batería	Ventajas	Desventajas
Baterías de Ion de Litio (Li-on)	Larga vida útil, baja tasa de auto descarga	Alto costo, complejo circuitos de carga.
Baterías de Níquel Cadmio (NiCd)	Entrega la capacidad completa	Tasa de descarga rápida
Baterías de Níquel-Metal Hidruro (Ni-MH)	Alta densidad de energía	Ciclo de carga y descarga inferior

Tabla 5 Ventajas y desventajas de diferentes tipos de baterías. Fuente:(Chien et al., 2016)

También en la tabla 6 se mencionan algunas propiedades de las baterías recargables más usadas para la alimentación de nodos WSN.

Tipo de Batería	SLA	Ni-Cd	Ni-MH	Li-on	Polym-Ly
Densidad de energía (Wh/Kg)	30	50	75	100	175
Ciclo de vida (Carga y descarga)	200-300	1500	500	300-700	600
Auto descarga	60% 24 meses	60% 4 meses	15% 1 mes	40% 5 meses	8% 1 mes
Voltaje nominal (V)	2	1.25	1.24	3.6	2.7

Tabla 6 Propiedades de baterías recargables (Senivasan et al., 2017)

Las baterías de ion de litio y las de litio polímeros se agrupan en una sola familia llamada Li+.

De estos cinco tipos los de SLA y NiCd no son adecuadas para sistemas de recolección de energía, la razón es porque las baterías SLA tienen baja densidad de energía, mientras que las baterías NiCd sufren de la pérdida de su capacidad causada por ciclos de descarga poco profundos, a menudo llamados efecto memoria y también se componen de cadmio que es un material altamente tóxico.

Solo nos queda realizar una comparación entre las baterías Ni-MH y Li-on para determinar cuál de las dos se ajusta mejor al propósito de este proyecto.

Las baterías Ni-MH pueden ser cargadas por goteo usando una corriente de entrada baja comparada con la de Li-on, aunque las de Li-on tienen ciclos de carga y descarga superior a las de Ni-MH y su densidad de energía es superior (Taneja, Jeong, & Culler, 2008).

Aunque las baterías de Li-on tienen numerosas ventajas con respecto a las baterías de Ni-MH son más costosas y requieren de un complicado circuito de carga para evitar efectos nocivos que reducen la vida útil de la batería, por estas condiciones se descarta el uso de baterías Li-on y se seleccionan baterías Ni-MH para este proyecto.

En este trabajo hemos escogido baterías Ni-MH AA marca Energizer modelo NM-15, para el almacenamiento de la energía solar proveniente del panel solar para la alimentación del NodeMCU v1.0/V3.



Los Libertadores
Fundación Universitaria

5.5 Sistemas de conmutación de baterías recargables y paneles solares

En la actualidad hay pocos artículos de investigación que han desarrollado sistemas de conmutación con solo baterías recargables y paneles solares para la alimentación de nodos sensores WSN, por lo general en la literatura se describen procedimientos de recolección de energía utilizando sistemas híbridos de supercapacitores y baterías para el almacenamiento de la energía solar.

Los supercapacitores tienen una ventaja como almacenadores de energía y es que tienen ciclos de carga y descarga muy alto comparados con las baterías tradicionales, pero por otro lado presentan una desventaja y es que tienen poca capacidad de almacenamiento de la energía, lo que no los vuelve viables en el desarrollo del presente proyecto.

En el artículo (Chien et al., 2016) se desarrolló un sistema muy simple de conmutación de baterías recargables y paneles solares para la alimentación de nodos WSN.

El autor utilizó solo cuatro componentes en su diseño los cuales han sido utilizados en otro tipo de proyectos de recolección de energía para nodos WSN, inclusive los que trabajan con sistemas híbridos de baterías y supercapacitores.

Estos componentes son:

- Panel solar
- Baterías recargables
- Regulador de voltaje
- Nodo WSN

En la figura 7 podemos observar el diagrama de bloques del sistema de recolección de energía utilizado por el autor del artículo científico:

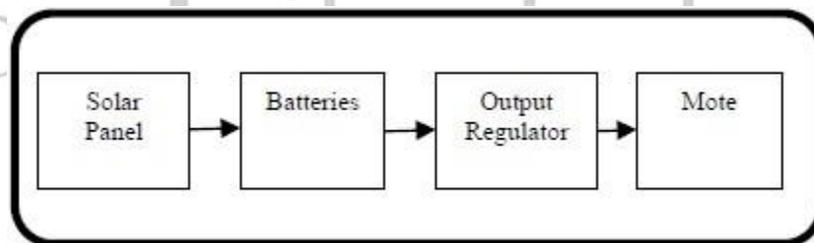


Figura 7 Diagrama de bloques de sistema de recolección de energía solar para nodo WSN. Fuente: (Chien et al., 2016)

En muchos artículos los autores utilizan un circuito integrado (CI) seguidor del punto de máxima potencia MPPT (por sus siglas en inglés, Maximum Power Point Tracker), el cual es un controlador de carga que se encarga de establecer el balance para que los paneles solares operen a su máxima potencia para proporcionar una mejor eficiencia energética.

En el artículo (Senivasan et al., 2017) los autores utilizan un MPPT de baja potencia, baterías recargables Ni-MH que proporcionan la energía en los momentos en que no hay sol y un convertidor DC-DC para regular el voltaje al nodo.

Las ventajas de utilizar un circuito MPPT en un sistema de recolección de energía solar es que podemos determinar el punto de potencia máxima que nos brinda el panel solar para aprovechar al máximo su energía, pero por otro lado su desventaja radica en que la mayoría de circuitos integrados MPPT del mercado, están diseñados para aplicaciones de alta potencia consumiendo mucha energía y por lo tanto el funcionamiento del nodo y el almacenamiento de la energía va decaer.

Es por ello que en este proyecto no utilizamos un seguidor MPPT ya que debemos ahorrar el máximo de energía que podamos ya que el NodeMCU v1.0/V3 que es el nodo WSN que utilizamos en este proyecto consume más potencia que otro de los nodos WSN que podemos conseguir en el mercado más especializados.

Otro componente importante dentro de un sistema de recolección de energía solar son los reguladores, en la mayoría de los diseños se utilizan reguladores conmutados que es un tipo de convertidor DC-DC elevador (Boost) que a su salida genera una tensión mayor que a su entrada. En el artículo (Senivasan et al., 2017) podemos ver el diagrama de bloques de un sistema de conmutación utilizando un convertidor DC-DC y un circuito seguidor MPPT para un sistema de recolección de energía solar.

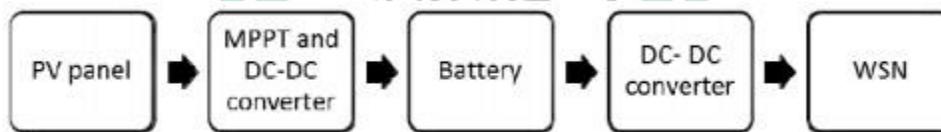


Figura 8 Diagrama de bloques de un sistema de recolección de energía para nodo WSN (Senivasan et al., 2017)

Una de las grandes ventajas de los convertidores DC-DC Boost es que pueden elevar la tensión y reducir el número de baterías conectadas en serie para la alimentación del nodo WSN.

Si utilizamos dos baterías en serie su voltaje es de 2.4V no alcanza para alimentar al nodo sensor, es por ello que al utilizar un convertidor DC-DC Boost podemos incrementar el voltaje hasta de 2.7v a 3V con el que funciona el nodo.

En este proyecto no utilizamos un convertidor DC-DC Boost, sino un regulador de 3.3V ya que utilizamos tres pilas AA Ni-MH en serie que suman 3.75V suficiente para el funcionamiento del NodeMCU.

En el diseño de un prototipo de recolección de energía solar para la autonomía energética de una red WSN para edificios inteligentes, llamado Heliomote (Raghunathan, Kansal, Hsu, Friedman, & Srivastava, 2005), los autores mencionan que lo más importante y complejo del proyecto fue el diseño del sistema de almacenamiento de la energía.

Los autores del prototipo Heliomote no utilizan un circuito MPPT, porque consume mucha energía, para el almacenamiento de la energía utilizan dos baterías recargables AA Ni-MH que junto con un diodo Schottky brinda conmutaciones rápidas entre los estados de conducción directa e inversa y muy bajas tensiones de umbral, evitando el flujo de corriente inversa hacia el panel solar.

5.6 APIs para el Internet de las cosas

El desarrollo de aplicaciones en la nube es uno de los procesos más importantes de la tecnología IoT, ya que al momento en que los nodos sensores registran los datos del entorno es muy importante ir transmitiendo y guardando los datos en aplicaciones en la nube con gran capacidad de almacenamiento para su análisis en tiempo real o tener acceso en cualquier momento a ellos.

En la actualidad existen múltiples plataformas y APIs por sus siglas en inglés (Application Programming Interface), para su uso en IoT en este trabajo utilizamos una muy interesante que se llama ThingSpeak

5.6.1 ThingSpeak

ThingSpeak es una aplicación de código abierto de internet de las cosas, con esta aplicación podemos recopilar, almacenar, analizar, visualizar y actuar sobre los datos transmitidos por nodos sensores o cualquier otro microcontrolador conectado a internet como Arduino, Raspberry Pi, NodeMCU o cualquier otro hardware, siempre y cuando sean compatibles con los protocolos TCP/IP, HTTP o MQTT.

Con ThingSpeak se pueden crear canales públicos o privados donde se visualiza los parámetros de interés en tiempo real registrado por algún tipo de sensor, como por ejemplo, temperatura, humedad, presión, etc., enviados desde cualquier microcontrolador conectado a internet y tiene la opción de que por cada canal se pueden crear 8 campos para la transmisión de varios parámetros al mismo tiempo, también cuenta con 4 datos posicionales dentro de las configuraciones del canal como son descripción, latitud, longitud y elevación (Gómez Maureira, Oldenhof, & Teernstra, 2014).

Para utilizar ThingSpeak primero debemos crear una cuenta en MathWorks, luego se inicia sesión y se configura un nuevo canal público o privado para la recepción de los datos, luego se programa el dispositivo que vayamos a utilizar en nuestro caso el NodeMCU, el cual envía los datos por medio del método POST del "Protocolo de Transferencia de Hipertexto" (HTTP), la comunicación ocurre a través de texto plano JSON o XML, luego los datos son almacenados en la nube para descargarlos posteriormente para su análisis como se puede apreciar en la figura 9.

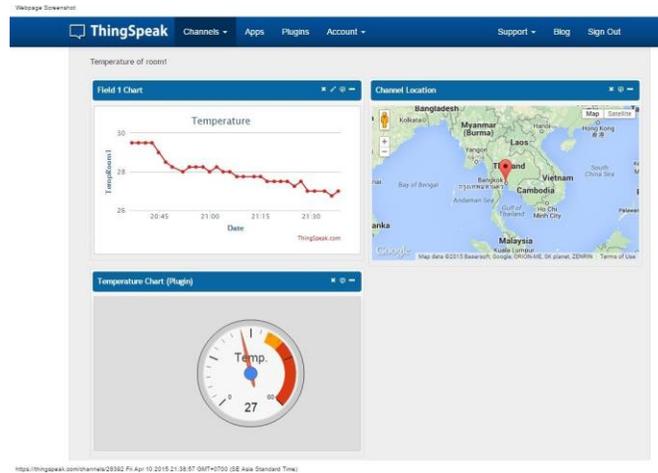


Figura 9 Interfaz gráfica de plataforma ThingSpeak. Fuente: <https://thingspeak.com/>

5.6.1.1 Ventajas de ThingSpeak

En este proyecto se trabaja con ThingSpeak porque es una aplicación de datos abierta diseñada para aplicaciones IoT en la nube, tiene la opción de crear canales donde se pueden almacenar distintos tipos de proyectos y también la visualización de los datos es muy amigable ya que se realiza por medio de gráficos spline del parámetro de interés vs tiempo.

También la API ThingSpeak utiliza uno de los mejores servidores de aplicaciones llamado Enterprise-Phusion Passenger la cual proporciona soporte adicional en cuanto a la seguridad y soporte en lenguajes de programación Ruby, Python y Node.js (Gómez Maureira et al., 2014).

La API ThingSpeak puede ser configurada para reportar avisos por medio de una cuenta de Twitter asociada a la aplicación, cuando algún parámetro o alguna condición de alerta programada por el usuario se haya cumplido.

Se pueden realizar análisis de los datos por medio de Matlab ya que ThingSpeak proporciona acceso a esta plataforma.

En este proyecto utilizamos un NodeMCU v1.0/V3, el cual se programa por medio de IDE de arduino con librerías ThingSpeak instalada previamente para él envió de datos a la plataforma lo que resulta en otra gran ventaja ya que es muy fácil de programar y utilizar.

Una de las desventajas al utilizar ThingSpeak es que la API realiza el registro de los datos cada quince segundos, esto resulta ser un problema en aplicaciones que necesiten estar enviando datos en milisegundos, pero en nuestro caso no es un inconveniente.

6 MARCO TEORICO

6.1 La energía solar

El sol es la principal fuente de energía sobre nuestro planeta, es por ello que debemos aprovechar todo su potencial energético, para las aplicaciones tecnológicas del futuro y desechar las energías no renovables que contaminan y están destruyendo nuestro planeta.

El sol se encuentra a una distancia de 150 millones de Km de nuestro planeta una distancia que equivale aproximadamente a 1 U.A. unidad astronómica, su temperatura interna es de unos 20 millones de grados Kelvin, tiene un diámetro de 1 400 000 km y su radiación electromagnética la cual está conformada por un conjunto de ondas electromagnéticas de diferente frecuencia, se produce por la fusión de átomos de hidrogeno en helio.

La magnitud que mide la potencia de radiación incidente por unidad de superficie se llama irradiancia y su unidad de medición se da en unidades de W/m^2 .

La irradiancia medida en la parte externa de la atmosfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del sol está determinada por la constante solar (G), que equivale a $1366W/m^2$.

Luego cuando la radiación entra a la atmosfera del planeta la irradiancia al nivel del mar es de aproximadamente $1000 W/m^2$.

6.1.1 Radiación solar

La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del sol en forma de ondas electromagnéticas en diferentes frecuencias (luz visible, infrarroja y ultravioleta).

Una de las formas de extraer la energía que proviene de la radiación solar es a través de paneles solares los cuales están conformados por células fotovoltaicas que transforman la luz proveniente del sol en electricidad por medio del efecto fotovoltaico.

En la superficie de la tierra la radiación proveniente del sol llega de tres formas:

- **Radiación Directa:** es la radiación que llega directamente del sol en sentido perpendicular a un punto determinado.
- **Radiación Difusa:** es la radiación que se dispersa al entrar en la atmosfera terrestre por las distintas moléculas de gas que hay se encuentran, esta radiación es más frecuente en días nublados.
- **Radiación de Albedo:** es la radiación que llega por reflejo al chocar los rayos sobre determinada superficie.

En la mayoría de las instalaciones fotovoltaicas los paneles solares se deben instalar con un grado de inclinación ya que el ángulo de incidencia de la luz solar está cambiando durante el día.

Un panel solar levemente inclinado recibe radiación directa (G_{bt}), radiación difusa (G_{dt}) y radiación reflejada por la tierra (G_{gt}), por lo tanto tenemos la siguiente ecuación:

$$G_t = G_{bt} + G_{dt} + G_{gt}$$

Ecuación 1 Radiación total

Donde **G_t** es la radiación total sobre una superficie inclinada (CATA SANCHEZ & RODRIGUEZ SÓCOLA, 2015)

6.1.1.1 Radiación solar en la ciudad de Bogotá-Colombia

La ciudad de Bogotá se encuentra ubicada a los $4^{\circ} 35'$ de latitud norte y $74^{\circ} 04'$ de longitud oeste, su temperatura promedio es de 14°C , tiene una altitud aproximadamente de 2630 metros sobre el nivel del mar, los datos de radiación solar de la ciudad es suministrado por el Instituto de hidrología, meteorología, y estudios ambientales IDEAM, el cual en su condición de autoridad meteorológica nacional es la encargada de generar conocimiento, obtener y garantizar el acceso a la información meteorológica y ambiental del país (Es & Atlas, 2005), la entidad cuenta con una amplia red de estaciones convencionales a nivel nacional y equipos especializados como actinógrafos y piranómetro para la medición de la radiación solar.

En la tabla 7 se presentan el promedio de irradiación global media recibida en superficie, expresado en Wh/m^2 por día para la ciudad de Bogotá obtenido por la estación de la Universidad Nacional de Colombia.

Los Libertadores
Fundación Universitaria

ESTACION UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA (BOGOTÁ)												
PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACIÓN (Wh/m ²)												
HORA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0-1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
1-2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,4	0,5	0,4	0,2	0,4	0,4
2-3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
3-4	0,2	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3
4-5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,2	0,4	0,3
5-6	0,2	0,1	0,3	1,3	2,5	1,9	1,2	1,2	2,0	3,0	2,7	0,7
6-7	31,8	28,1	39,5	52,9	66,3	62,0	55,2	50,6	60,2	71,0	61,4	50,2
7-8	184,9	162,3	149,3	177,2	188,3	188,0	191,0	172,9	180,6	205,6	198,3	208,9
8-9	351,3	342,2	264,3	309,3	294,4	291,3	313,7	290,8	284,5	346,4	356,3	378,8
9-10	507,6	455,8	366,7	388,1	391,4	389,5	399,7	387,8	399,5	457,6	458,6	504,3
10-11	589,9	543,7	469,8	425,6	431,5	447,8	476,8	467,0	460,2	501,8	519,1	545,5
11-12	607,4	544,1	483,3	433,2	455,7	497,2	520,6	491,4	489,4	458,0	488,2	533,5
12-13	560,1	503,8	433,2	412,9	464,7	490,0	544,6	494,3	481,1	442,4	414,1	491,1
13-14	475,7	465,6	389,8	365,9	404,2	476,3	499,4	457,5	432,5	393,3	355,3	423,4
14-15	375,9	357,0	313,5	307,7	334,2	391,8	404,2	392,0	398,2	315,9	274,7	348,9
15-16	304,4	275,2	231,1	225,1	245,4	275,5	292,9	305,2	298,4	209,9	188,3	254,7
16-17	171,2	145,7	145,0	135,4	143,1	158,6	177,2	168,1	168,4	111,0	90,2	124,9
17-18	46,4	48,7	47,7	35,6	35,7	46,3	59,4	48,9	34,5	16,7	13,0	26,0
18-19	0,5	0,9	0,7	0,2	0,3	0,5	1,1	0,9	0,4	0,3	0,4	0,4
19-20	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,2
20-21	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3
21-22	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2
22-23	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3
23-0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,2	0,3	0,2
Acumulada diaria	4207,3	3873,1	3334,2	3270,4	3457,9	3716,7	3937,1	3728,5	3690,0	3533,0	3420,7	3891,2



Tabla 7 Comportamiento horario de la irradiación global horizontal en la ciudad de Bogotá. Fuente: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Para entender la interpretación de la tabla 7 se establecen cinco rangos, cada uno de $200 Wh/m^2$, con su respectivo color, en donde los de color verde son los promedios más bajos de radiación y los amarillos y anaranjados son los más altos.

6.1.2 Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico consiste básicamente en que cuando las partículas de luz llamadas fotones inciden en un material semiconductor tiene la capacidad de arrancar los electrones de sus átomos produciendo el movimiento de estos y por lo tanto generando una corriente eléctrica.

Para entender el efecto fotoeléctrico se colocan dos placas dentro de un tubo al vacío, los cuales están conectados a un amperímetro y a una batería con un potenciómetro que tiene la capacidad de variar el voltaje, y se incide una luz sobre el cátodo emisor hasta que se genere una corriente eléctrica por la transferencia de electrones de una placa a otra generada por el choque de los fotones, luego se varía el voltaje para contrarrestar el movimiento de los electrones dentro del circuito de esta forma se calcula el potencial umbral para determinar la energía de los electrones foto emitidos, este experimento comprueba que la energía cinética de los electrones foto emitidos es independiente de la intensidad del haz luminoso y depende solo de la frecuencia o longitud de onda de la radiación incidente.

6.2 Paneles solares fotovoltaicos

Los paneles solares fotovoltaicos están formados por un conjunto de células solares que son materiales semiconductores fabricados principalmente de silicio y de germanio, los cuales poseen cuatro electrones de valencia en su último nivel, los electrones de la última capa de valencia de un material semiconductor están débilmente ligados al núcleo del átomo, cuando la luz solar incide sobre el panel fotovoltaico los fotones transmiten su energía sobre los electrones ocasionando su movimiento de un átomo a otro, luego para lograr la corriente eléctrica, se divide al material semiconductor en dos capas uno tipo P (exceso de carga negativa) y uno tipo N (exceso de carga positiva) muy parecido a la estructura P-N de un diodo, en la capa superior tipo N, se dopa al semiconductor normalmente con fósforo el cual es un material que tiene más electrones que el silicio y en la capa inferior tipo P se dopa con Boro el cual tiene menos electrones que el silicio, de esta forma cuando la luz del sol incide sobre el panel solar causa recombinaciones electrón-agujero generando una corriente eléctrica.

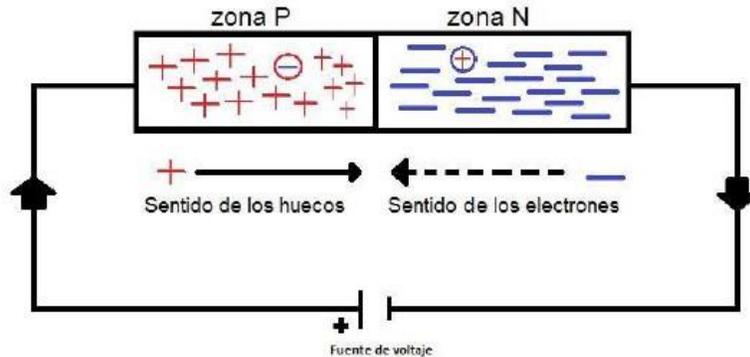


Figura 10 Modelo P-N

Cada fotocelda genera un voltaje de alrededor de 0.5V y una corriente alrededor de unos $35\text{mA}/\text{cm}^2$, la potencia eléctrica producida por la fotocelda está dada por la multiplicación de los valores instantáneos de voltaje y corriente $P=I*V$.

6.2.1 Tipos de paneles solares fotovoltaicos

El 90% de los paneles solares que se fabrican hoy en día son de silicio cristalino, los cuales existen tres tipos de tecnología:

- **Monocristalinos:** tienen forma octogonal, se fabrican por medio del método Czochralski, se crea por medio de un lingote de silicio de alta pureza de ahí su nombre, tiene una mayor eficiencia entre el 16% comparado con los policristalinos y los amorfos, mayor vida útil, trabajan mejor con poca luz.

- **Policristalinos:** tienen formas cuadradas, para su fabricación utilizan muchos cristales de silicio y los derriten dentro de un molde rectangular, se pueden reconocer fácilmente ya que en su superficie tienen un aspecto granulado, presentan una eficiencia menor que los monocristalinos alrededor del 14% y son más tolerantes a los cambios de temperatura que los monocristalinos.
- **Amorfos (película delgada):** la nueva tecnología de silicio amorfo consiste en una tecnología de lámina delgada, para su fabricación rocían el producto preparado en cualquier material, de esta forma pueden ser flexibles y delgados, su eficiencia es del 5%.

6.2.2 Curva I-V

La curva I-V es una gráfica donde podemos observar las características de corriente en función del voltaje que el panel solar nos ofrece dependiendo de la irradiación y la temperatura, y en donde podemos ubicar el punto de máxima potencia de funcionamiento.

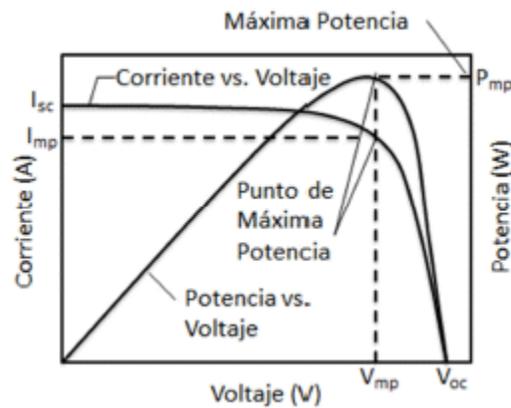


Figura 11 Curva I-V fuente: (Vargas & Abrahamse, 2014)

6.2.3 Parámetros de un panel solar fotovoltaico

Los parámetros más importantes a la hora de seleccionar un panel solar para un determinado proyecto son:

- La corriente de corto circuito (I_{sc})
- Voltaje a circuito abierto (V_{oc})
- Punto de potencia máxima
- Factor de forma
- Eficiencia

6.2.3.1 La corriente de corto circuito (I_{sc})

La corriente de corto circuito I_{sc} es uno de los parámetros más importantes, se refiere a la máxima corriente que puede entregar el panel solar y su forma de medirlo es con un amperímetro, el panel debe estar cortocircuitado es decir sin ningún tipo de resistencia por lo tanto el voltaje entre sus terminales es cero.

6.2.3.2 Voltaje a circuito abierto (V_{oc})

El voltaje de circuito abierto es la tensión máxima dada por el panel solar, este parámetro se mide con un voltímetro entre los terminales del panel a circuito abierto.

6.2.3.3 Punto de potencia máxima

Este parámetro nos indica el punto donde el panel nos ofrece su mayor rendimiento al entregarnos su máxima potencia, se obtiene multiplicando la corriente de corto circuito (I_{sc}) por el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) por el factor de forma (FF).

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF$$

Ecuación 2 Punto de potencia máxima

6.2.3.4 Factor de forma

El parámetro de factor de forma (FF, del inglés, Fill Factor) es un indicador de que tan bueno es el panel solar en términos de potencia, su valor viene dado por la relación entre la potencia máxima del panel solar y el producto entre el voltaje de circuito abierto y la corriente de corto circuito.

El factor de forma de un panel solar debe ser mayor a 0.7 con lo cual podemos establecer cuanto más se acerque a la unidad más potencia puede dar (CATA SANCHEZ & RODRIGUEZ SÓCOLA, 2015).

$$FF = \frac{I_M \times V_M}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

Ecuación 3 Factor de forma FF

6.2.3.5 Eficiencia

La eficiencia de un panel solar fotovoltaico define la relación entre la potencia máxima entregada por el panel solar y la irradiancia que incide sobre él, en otras palabras, es el porcentaje de cuanto de toda la energía que incide sobre este se convierte en electricidad.

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}}$$

Ecuación 4 Eficiencia

6.2.4 Modelamiento matemático de una celda solar

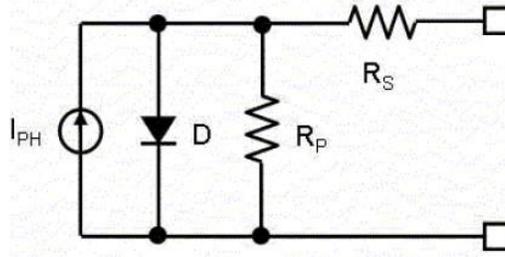


Figura 12 Modelo circuital de una celda solar. Fuente: (Saucedo García, 2010)

La figura 12 muestra el circuito equivalente de una celda solar, como podemos observar una celda solar tiene la misma característica de funcionamiento de un diodo. En condiciones de poca luz la corriente eléctrica que circula por la celda solar corresponde a la ecuación del diodo de Shockley:

$$I_d = I_o \left(e^{\frac{V_d}{nV_t}} - 1 \right)$$

Ecuación 5 Corriente del diodo

Donde,

I_o = es la corriente de saturación en oscuridad del diodo

V_d = es la tensión aplicada al diodo

n = factor de idealidad del diodo

Para una temperatura ambiente de 300 K,

$$V_t = \frac{kT}{e} = 25,85mV$$

Ecuación 6

Donde,

k = es la constante de Boltzmann

T = es la temperatura del diodo en grados Kelvin

e = es la carga del electrón

La fuente de corriente I_{ph} genera una corriente que es proporcional a la energía incidente sobre el panel, de esta forma cuando no hay una carga conectada toda la corriente pasa por el diodo cuyo voltaje determina el voltaje de circuito abierto V_{oc} , este voltaje varía dependiendo del material semiconductor del que está hecho el panel solar pero en términos generales para las celdas de silicio está en el rango de 0.5V y 0.6V.

Al momento en que la luz incide sobre la celda solar, la corriente de salida I_L es igual a la diferencia entre la corriente fotogenerada I_{ph} y la corriente del diodo I_d .

Cuando la corriente fluye hacia la carga, la corriente que pasa por el diodo se hace tan pequeña y su voltaje disminuye a cero, esta corriente se conoce como la corriente de corto circuito I_{sc} de la celda solar.

La resistencia en paralelo R_p se debe algunas imperfecciones en la calidad de la unión P-N (Rivera Flores Norma Rosario, 2015), y la resistencia en serie R_s representa las pérdidas propias del material semiconductor del cual está hecho la celda y pérdidas por conexión.

Estas resistencias afectan directamente el factor de forma visto en la ecuación 3, y determinando la eficiencia del panel.

Finalmente la ecuación característica de una celda solar queda determinada por la siguiente ecuación:

$$I = I_l - I_0 \left[e^{\frac{e(V+IR_s)}{kTc}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

Ecuación 7 Ecuación característica de una celda solar

6.3 Dispositivo de almacenamiento de la energía

6.3.1 Baterías eléctricas

Las baterías son dispositivos que a partir de una reacción química producen energía eléctrica, esto ocurre mediante reacciones de oxidación-reducción también llamado reacción redox, entre el ánodo y el cátodo.

Hay dos tipos de baterías:

- **Baterías primarias:** comúnmente llamadas pilas, son aquellas que una vez agotada su reacción química no pueden volver a recargarse.
- **Baterías secundarias:** son aquellas que se pueden volver a cargar mediante una fuente de corriente continua desde una fuente externa.

Una batería se compone de dos o más celdas electroquímicas y esta a su vez se compone de cuatro elementos principales como se muestra en la figura 13, tiene dos electrodos compuesto cada uno de un metal distinto, el electrodo cargado positivamente se llama ánodo, es en donde se lleva a cabo el proceso de reducción (procedimiento donde se capta electrones) y el electrodo cargado negativamente se llama cátodo en donde se lleva a cabo la oxidación (cede electrones), también podemos observar el electrolito el cual es una solución acuosa de un ácido, de una base o sales que permite que los iones se muevan entre los electrodos produciendo una diferencia de potencial entre los terminales y el separador el cual se encarga de aislar el ánodo y el cátodo evitando un corto circuito.

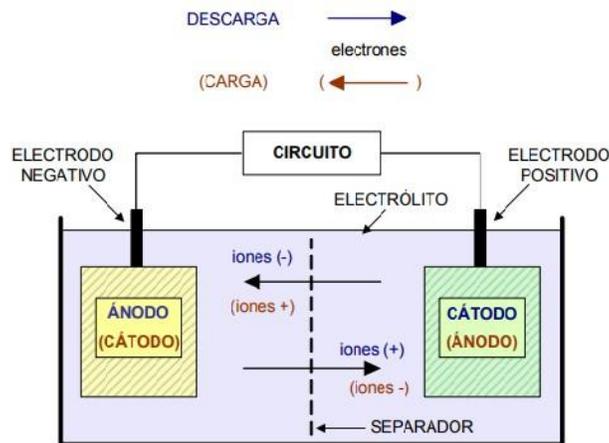


Figura 13 Elementos de una celda recargable. Fuente: (Viera Pérez, 2003)

En el caso de las baterías recargables cuando el metal que compone al ánodo se oxida completamente, es cuando se dice que la batería se ha descargado, entonces se realiza el procedimiento inverso, en este caso con una fuente externa de corriente, se invierte el proceso de oxidación del metal haciendo que los electrones vuelvan al metal para que estén disponibles una vez más para el proceso de oxidación-reducción.

Los tipos de baterías más comunes son:

- Plomo-acido (Pb-ácido)
- Nickel-Cadmio (Ni-Cd)
- Nickel-hidruro metálico (Ni-MH)
- Ion-Litio (Li-ion)
- Polímero-Litio (Li-poly)
- Aire-zinc
- Celdas de combustible

Las características más importantes de una batería son:

- El voltaje
- Corriente eléctrica
- Capacidad de carga
- Índice C
- Energía
- Densidad de energía
- Energía específica
- Autodescarga
- Efecto memoria
- Vida útil

6.3.1.1 El voltaje

Está definido como la diferencia de potencial eléctrico que existe entre dos puntos, es decir es una medida de cuanta energía se necesita para mover una carga entre dos puntos en un sistema eléctrico.

Su unidad de medida se da en voltios en honor al científico Alessandro Volta, un voltio describe que se requiere de 1 Joule de energía para mover una carga de 1 Coulomb(Boylestad, 2004).

Su ecuación está determinada por:

$$1V = \frac{1J}{1C}$$

Ecuación 8 Voltaje

Donde J, se refiere a joule y C se refiere a un coulomb.

En una batería la tensión

6.3.1.2 La corriente eléctrica

Es el flujo de electrones por unidad de tiempo que atraviesa un conductor eléctrico.

Está determinado por la siguiente ecuación:

$$I = \frac{Q}{t} (A)$$

Ecuación 9 Corriente eléctrica

Donde I es la corriente, Q es la carga eléctrica en unidades de Coulomb y t es el tiempo medido en segundos.

La corriente eléctrica se mide en Amperios en honor al científico André Marie Ampere, un amperio está determinado por el flujo de $6.242 * 10^{18}$ electrones que pasan por un punto de un material conductor en un segundo.

En el Sistema Internacional de Medidas un Coulomb equivale a $6.242 * 10^{18}$ de electrones.

6.3.1.3 Capacidad de carga

Este concepto nos indica cuanta corriente puede suministrar una batería durante un tiempo determinado.

El valor de la capacidad de una batería (C) se calcula como la integral de la corriente a lo largo de un determinado periodo de tiempo (Viera Pérez, 2003).

$$C = \int_{t_1}^{t_2} i * dt$$

Ecuación 10 Capacidad de una batería

Por ejemplo si una batería tiene una capacidad (C) de 10Ah, para un tiempo de descarga de 1 hora, el valor de la corriente nominal sería de 10A.

6.3.1.4 Índice C

Es una medida de la razón de carga y de descarga de una batería proporcional a su capacidad dada en amperios-hora, establecida por el fabricante para indicarnos la corriente máxima de carga y descarga con la que cuenta la batería esto con el fin de prevenir daños en la batería durante su carga o descarga.

$$C = \frac{1}{h}$$

11 Índice C

Donde C: es la tasa de carga y descarga de baterías, h: hora.

Algunos fabricantes especifican este valor por medio de un numero fraccionario, por ejemplo para C/20 = 10A, quiere decir que la batería puede suministrar 10A por 20 horas.

6.3.1.5 La cantidad de energía

La cantidad de energía que puede suministrar una batería depende de su capacidad y el voltaje, este valor puede calcularse al multiplicar el valor del voltaje nominal por el número de amperios-horas, está dado en unidades de Wh.

$$1Wh = 3600J$$

$$1J = 0,278mWh$$

Ecuación 12 Conversión de Watios a Joules

6.3.1.6 Densidad de energía

Es la energía que se puede almacenar por unidad de volumen, su unidad está dada en (Wh/l).

6.3.1.7 Energía específica

Es la energía que se puede almacenar una batería por unidad de peso, su unidad está dada en (Wh/Kg)(Viera Pérez, 2003).

6.3.1.8 Autodescarga

Es la pérdida de la capacidad de la batería con respecto a la capacidad nominal cuando está en circuito abierto, se mide como un porcentaje en tiempos de un mes.

6.3.1.9 Efecto memoria

Es la reducción de la capacidad de las baterías por cargas incompletas, es decir cuando recargamos una batería que no se ha descargado completamente, esto conlleva a que las baterías pierden su capacidad de cargarse al 100%, produciendo una disminución en el tiempo de uso y por lo tanto hay que recárgalas constantemente.

6.3.2 Baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH)

Las baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH) es una tecnología en baterías muy novedosa que en la actualidad está reemplazando las baterías de Ni-Cd, por múltiples características como es que tiene una mayor densidad de energía, su ánodo está fabricado con metal hidruro y sin cadmio evitando contaminación, tiene una alta tasa de autodescarga, mayor densidad de energía que las de Níquel-cadmio y su efecto de memoria es casi despreciable.

Esta batería es utilizada hoy en día en múltiples aplicaciones industriales, por ejemplo en vehículos de propulsión eléctrica como General Motors EV1, Honda EV Plus, Ford Ranger EV, también varios modelos de robots lo utilizan como el prototipo humanoide ASIMO diseñado por Honda(Vergara, n.d.).

6.3.2.1 Composición Electroquímica de baterías Ni-MH

El electrodo positivo (ánodo) está compuesto de oxihidróxido de níquel y el electrodo negativo está compuesto de hidruro metálico (cátodo), el cual es una aleación que permite almacenar el hidrogeno que se genera durante la carga y se libera durante la descarga.

El electrolito en estas baterías está compuesto principalmente de hidróxido de potasio, su tecnología se basa principalmente en reacciones de absorción y desabsorción de hidrogeno en el cátodo.

6.3.2.2 Características de baterías Ni-MH Energizer NH-15

La batería Ni-MH de Energizer tienen ciertas características importantes como son que su voltaje nominal es de 1.25V/celda, se puede recargar ciento de veces, la expectativa de vida útil es de 2 a 5 años, funciona bien en un amplio rango de temperaturas como es de 0 a 50°C para carga y descarga.

Son ideales para la alimentación de dispositivos que se utilizan con frecuencia como, por ejemplo, cámaras digitales, unidades de GPS, Mp3 y demás dispositivos digitales de bajo consumo (Manual, 2010).

Las baterías Ni-MH tienen una resistencia interna (R_i) muy baja durante la descarga alrededor de unos 50 mili ohmios que permite que esta batería tenga un buen rendimiento.

En la figura 14 y 15 (Manual, 2010), podemos observar las curvas de cargas y descargas de la baterías Ni-MH

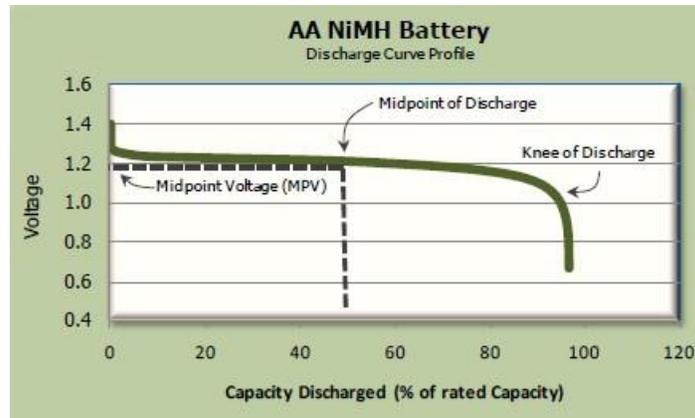


Figura 14 Curva de descarga de baterías NM15. Fuente:(Manual, 2010)

En la figura 14 se puede observar como la caída inicial de circuito abierto de aproximadamente de 1.4V cae rápidamente a 1.2V y luego cuando llega al final de la descarga el voltaje cae precipitadamente.

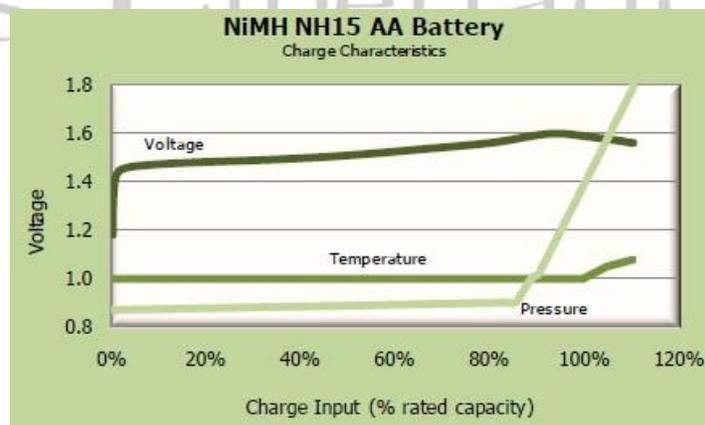


Figura 15 Curva de carga de baterías NM15. Fuente:(Manual, 2010)

En la carga las baterías de Ni-MH son más sensibles que las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd), ya que se debe controlar la sobrecarga para evitar pérdidas en el ciclo de vida.

Las baterías de Ni-MH operan sobre una carga exotérmica, basada en hidrogeno y un proceso de recombinación de oxígeno.

En la figura 15 se observa la curva de carga de una batería Ni-MH, el voltaje aumenta en la carga inicial y aumenta gradualmente a través de la carga hasta que alcanza el 100%, luego cuando el voltaje llega a su punto máximo de 1.6V disminuye gradualmente.

También observamos el comportamiento de la temperatura durante la carga, dado que el proceso de carga es exotérmico, el calor se libera durante la carga dando una pendiente positiva a la curva de la temperatura.

Cuando la batería alcanza una carga excesiva donde la mayor parte de la energía que ingresa a la batería se convierte en calor, la temperatura de la batería aumenta drásticamente.

Una carga extremadamente rápida alrededor de una hora puede impactar negativamente el ciclo de vida de la batería.

Un cargador que aplique una tasa de 0.1C por 12 a 14 horas es ideal para este tipo de baterías.

Se prefiere el uso de cargas por goteo muy pequeñas (0.025C) para reducir el efecto negativos de sobrecarga (Manual, 2010).

6.3.3 Supercapacitores

Los supercapacitores también conocidos como ultracondensadores o condensadores electroquímicos de doble capa, EDLC por sus siglas en inglés, presentan el mismo comportamiento que un condensador normal salvo con una capacitancia mucho mayor.

Un supercapacitor tiene la ventaja de tener mayor densidad de potencia que las baterías pero menor densidad de energía, pero tienen mayor densidad de energía que los capacitores electrolíticos en cambio las baterías tienen mucha mayor densidad de energía que los supercapacitores pero menor densidad de potencia lo que es una ventaja al combinar estos dos dispositivos, para sistemas de almacenamiento de la energía (Naveen & Manjunath, 2011).

En la figura 16 podemos observar una comparación entre los elementos almacenadores de energía más comunes y sus densidades de potencia y energía específica.

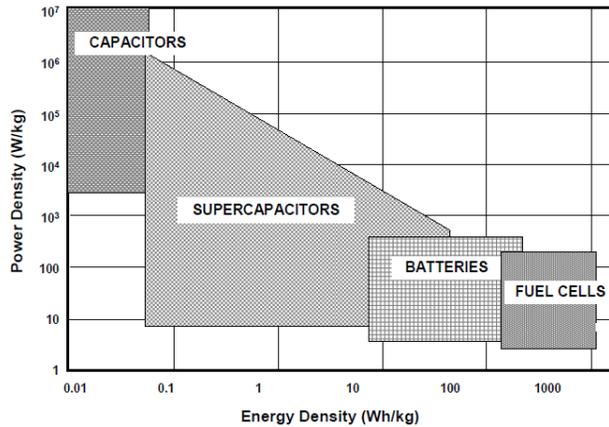


Figura 16 Energía y potencia específica para distintos de tipos de almacenamiento de energía. Fuente: (Halper & Ellenbogen, 2006)

Una novedosa estrategia que se ha venido planteado en recientes investigaciones para alargar la vida de las baterías y así de los nodos de una red de sensores inalámbricos, es el uso de un sistema híbrido de recolección y almacenamiento de la energía por medio de baterías y supercapacitores que se conoce como sistema HESS (Híbrido energy store system),(Cabrane, Ouassaid, & Maaroufi, 2016).

La mayoría de diseños HESS pueden trabajar con distintas fuentes de recolección de energía renovables a través de la conversión fotovoltaica, la vibración, piezoeléctrica, termoeléctrica, acústica.

La energía fotovoltaica es la que nos entrega mayor densidad de potencia, es por ello, que es el mecanismo de recolección de energía más adecuado para aplicaciones al aire libre utilizando un sistema HESS.

La energía total disponible en un supercapacitor ideal viene dada por la siguiente ecuación 13.

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

13 Energía disponible en un supercapacitor ideal

La tensión de salida no plana de supercapacitores hace que la energía utilizable sea menor que la energía total disponible(Joshi & Zhu, 2015), por ello la energía utilizable por los supercapacitores está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} C(V^2 - V_{min}^2)$$

14 Energía utilizable por los supercapacitores

Donde, V_{min} : es el voltaje mínimo del condensador necesario para el funcionamiento del nodo sensor.

6.3.3.1 Circuito equivalente clásico de un supercapacitor

El circuito se compone de una capacitancia, una resistencia en serie equivalente (ESR), esta resistencia en serie equivalente ESR, (colectores de corriente, electrodos y material dieléctrico) y una resistencia en paralelo (EPR) que produce una corriente de autodescarga cuando el supercapacitor no está conectado a la fuente de alimentación (Rodr & Fonseca, 2015).

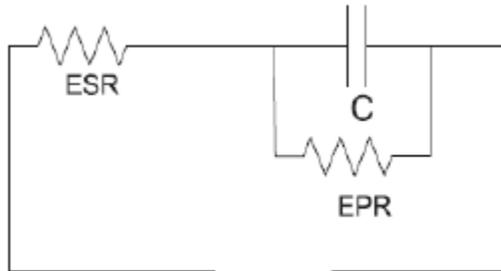


Figura 17 Circuito equivalente de un supercapacitor. Fuente: (Rodr & Fonseca, 2015)

6.3.3.1.1 Cálculo de la resistencia EPR

El valor de esta resistencia determina el comportamiento de autodescarga del supercapacitor y se calcula con la ecuación.

$$EPR = \frac{-t}{\ln\left(\frac{V2}{V1}\right) * C}$$

15 Cálculo de resistencia EPR

Donde, EPR: resistencia paralela equivalente, t: tiempo en (s) de autodescarga, V2: voltaje final de autodescarga, V1: voltaje inicial de la autodescarga, C: capacitancia en faradios.

6.3.3.1.2 Cálculo de la resistencia ESR

Se determina solo cuando se presenta un cambio de voltaje y corriente en el instante en que comienza el proceso de descarga del supercapacitor.

$$ESR = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

16 Cálculo de resistencia ESR

Donde, ΔV : diferencia de voltaje en el primer instante de descarga, ΔI : diferencia de corriente en el primer instante de descarga.

6.4 Regulador de voltaje

Un regulador de voltaje es un dispositivo electrónico que ajusta un nivel de voltaje constante y estable a su salida independiente a las variaciones de voltaje en la entrada para lograr la alimentación requerida de un circuito u otro dispositivo electrónico.

Por lo general cuentan con tres pines, el pin de entrada de voltaje, un pin de tierra y el pin de salida de voltaje regulado.

6.4.1 Requerimientos de un regulador

- Debe mantener una tensión de salida constante independiente a las variaciones de voltaje en la entrada y con respecto a la temperatura.
- Debe mantener la tensión de salida estable independiente del consumo de la carga (dentro de la capacidad dada por la hoja de datos)
- El voltaje de salida no debe contener componentes de una señal alterna.
- Debe poder limitar la corriente de salida.

Existen distintos tipos de reguladores para múltiples aplicaciones entre ellos podemos encontrar los siguientes:

- Reguladores integrados lineales
- Reguladores conmutados

6.4.2 Reguladores integrados lineales

Estos reguladores son de fácil uso, bajo costo y muy eficientes en aplicaciones de baja potencia, contienen en su interior los circuitos de fuentes de referencia, un amplificador comparador, un dispositivo de control y la protección contra sobrecargas (Lineales, 2011).

Estos reguladores pueden ser de tensiones de salida positiva o negativa con valores de voltaje fijo o ajustable.

La serie más conocida de reguladores integrados lineales son los 78xx para tensiones positivas y los 79xx para tensiones negativas

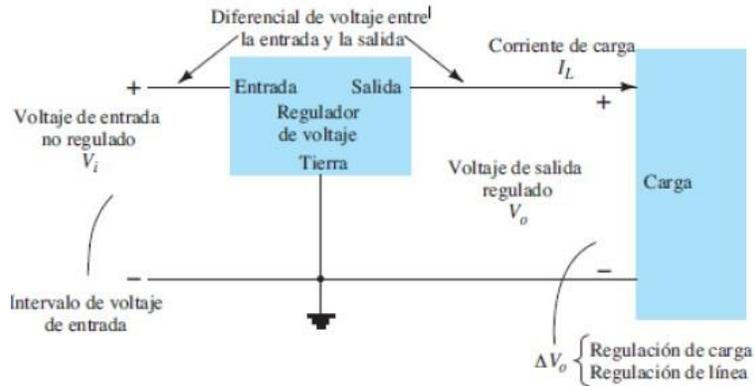


Figura 18 Regulador de voltaje de tres terminales. Fuente: ("Reguladores de voltaje de circuito integrado," n.d.)

Entre los reguladores lineales hay uno muy importantes que son los reguladores de bajo diferencial o baja caída (LDO), estos reguladores son muy importantes en aplicaciones donde se requiere trabajar con voltajes de entrada relativamente bajo que no interfiera en el voltaje de salida.

6.4.2.1 Reguladores lineales LDO (Low Drop Out)

Este tipo de reguladores permite obtener una tensión regulada con un caída de tensión interna mucho menor que los reguladores convencionales, lo que los hace más eficientes en términos energéticos ya que disipan menos energía.

Los reguladores LDO son ideales para aplicaciones donde se desea obtener una tensión regulada a partir de una fuente como puede ser baterías Ni-MH, evitando caídas de tensión muy altas lo que conlleva a un mejor rendimiento energético.

6.4.2.1.1 Regulador LDO MCP1700-3302E

El regulador que utilizamos en este proyecto es el regulador lineal LDO MCP1700 el cual es muy pequeño y cuenta con unas características muy interesantes.

En la figura 19 se describen los pines del regulador LDO MCP1700.

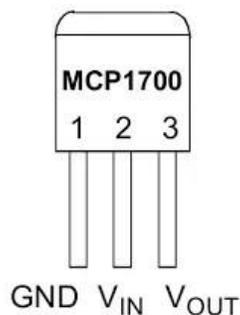


Figura 19 Pines de regulador MCP 1700. Fuente: <https://randomnerdtutorials.com/esp8266-voltage-regulator-lipo-and-li-ion-batteries>.

Parámetros	Valor
Voltaje de salida	+3.3V
Corriente de salida máxima	250mA
Corriente de operación baja	1.6 μ A
Voltaje dropout	178mV
Voltaje de salida preciso	\pm 0.4%
Máximo voltaje de entrada	6V

Tabla 8 Características de LDO MCP1700. Fuente:(Description & Description, 2007)

Como podemos observar en las características de este regulador la baja caída de voltaje lo que significa que si incluso por ejemplo si la batería es de 3.4V el regulador funcionaria, es por ello que es el regulador escogido en este proyecto.

6.4.2.2 Reguladores conmutados

También llamados convertidores DC-DC, son reguladores muy eficientes (alcanzan una eficiencia del 80%), están conformado por un transistor que conmuta entre la región de corte y saturación ya que en estas regiones el transistor disipa muy poco potencia.

Una de las características de este tipo de regulador es que también el voltaje de salida puede ser mayor que el de la entrada y puede ser de una polaridad opuesta a la polaridad de entrada.

En los reguladores de conmutación la salida se controla cambiando la anchura del pulso del oscilador en vez de controlarla la tensión de base como ocurre en los reguladores lineales.

Las desventajas de este tipo de regulador es que son más costosos y presentan un ruido en su salida regulada.

6.5 Diodo

El diodo es un dispositivo semiconductor de dos terminales que permite el paso de la corriente eléctrica en una sola dirección, los cuales tienen el símbolo y las características que aparecen en la figura 20.

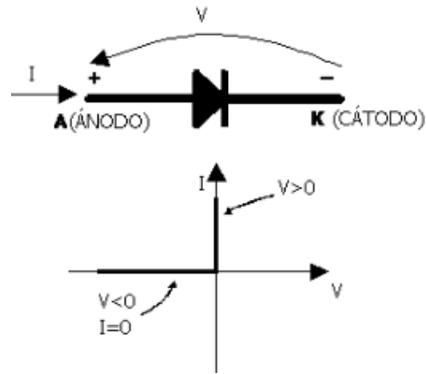


Figura 20 Diodo Ideal. Fuente : (L Boylestad & Nashelsky, 1997)

Está conformado por la unión de dos materiales semiconductores (construidos en la misma base: Ge o Si) dopados de tipo n (exceso de electrones) y de tipo p (exceso de huecos) formando una unión p-n, al unirse los electrones con los huecos en la zona cercana a la unión hay una falta de portadores, a esta región de iones positivos y negativos se le llama región de agotamiento (L Boylestad & Nashelsky, 1997).

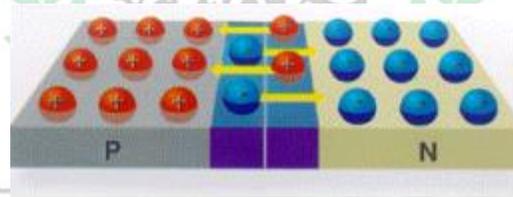


Figura 21 Región de agotamiento. Fuente: <http://www.geocities.ws/pnavar2/semicon/tipos.html>

6.5.1 Condiciones de polarización inversa ($V_d < 0$)

Si un voltaje externo se aplica a las terminales del diodo en forma de que el terminal positivo se conecte al material tipo n y la terminal negativa se conecte al material tipo p, el número de iones positivos en la región de agotamiento se incrementará por la cantidad de electrones libres atraídos por la fuente de voltaje y de igual forma el número de iones negativos se incrementará en el material tipo p por lo tanto la región de agotamiento se ampliará impidiendo el flujo de corriente.

A la corriente que existe en polarización inversa se le llama corriente de saturación inversa y se representa mediante I_s .

6.5.2 Condición de polarización directa ($V_d > 0$)

Cuando el voltaje es aplicado en forma de que el terminal positivo se conecte al material tipo p y el terminal negativo se conecte al material tipo n, se irá reduciendo el ancho de la

región de agotamiento al incrementarse el voltaje hasta que los electrones puedan ya pasar a través de la unión, lo que dará como resultado un incremento en la corriente de forma exponencial(L Boylestad & Nashelsky, 1997).

Por lo tanto la ecuación característica de un diodo semiconductor se puede definir mediante la ecuación para las regiones de polarización directa e inversa.

$$I_d = I_s (e^{\frac{V_d}{nV_t}} - 1)$$

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

Ecuación 17 Ecuación característica del diodo.

Donde, I_d : corriente por el diodo, I_s : corriente de saturación inversa, V_d : tensión aplicada al diodo, V_t : tensión de temperatura, k : cte. De Boltzman, q : carga del electrón, T : temperatura en kelvin, n : cte. De difusión ($Ge=1$, $Si=2$).

6.5.3 Diodo Schottky o diodo de barrera

El diodo Schottky o diodo de barrera, llamado así en honor al físico alemán Walter H. Schottky, son diodos que se caracterizan por tener una tensión umbral (para polarizaciones en directa) del orden de los 0.3V o menos, una alta velocidad de conmutación lo que permite rectificar señales de alta frecuencia(Zeljami, 2013).

Estos diodos operan a altas velocidades y se utilizan en fuentes de potencia, circuitos de alta frecuencia y sistemas digitales. En la figura 22 podemos observar su símbolo electrónico.

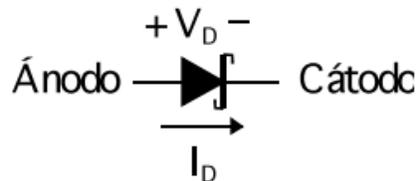


Figura 22 Símbolo electrónico del diodo Schottky. Fuente: (Sanchez, n.d.)

6.5.3.1 Funcionamiento de un diodo Schottky

El diodo Schottky está constituido por una unión de un metal y un sustrato semiconductor de tipo n, en lugar de una unión p-n de los diodos convencionales. El metal tiene una ventaja fundamental al funcionar solo con los portadores mayoritarios, que permiten operar a mas alta velocidad y por tanto a muy alta frecuencia (Zeljami, 2013)

Al igual que en un diodo convencional se forma una región de agotamiento en la que los electrones de la zona n buscan niveles de energía menores y pasan al metal.

Cuando un diodo Schottky se polariza en directa es decir se aplica una tensión positiva V_f al metal respecto al semiconductor, la anchura de la región de agotamiento disminuye y los electrones de la zona n es decir desde el semiconductor los electrones pasan al metal de esta forma solamente los portadores tipo n (electrones libres) desempeñan un papel significativo en el funcionamiento del diodo de esta forma la operación del dispositivo será mucho más rápida en comparación con las uniones p-n en donde las recombinaciones entre electrones y huecos ralentizan el proceso.

Con polarización inversa aumenta la anchura de la barrera para los electrones del semiconductor lo que disminuye el flujo de electrones del semiconductor al metal, mientras que el flujo de electrones del metal al semiconductor se mantiene inalterado, con un valor pequeño de corriente de pérdidas.

Algunas de las desventajas de este tipo de diodo es que tiene una menor tensión de ruptura y corrientes de pérdidas mayores que un diodo de unión.

En la figura 23 podemos observar la curva característica de un diodo Schottky en comparación con la curva característica de un diodo de silicio.

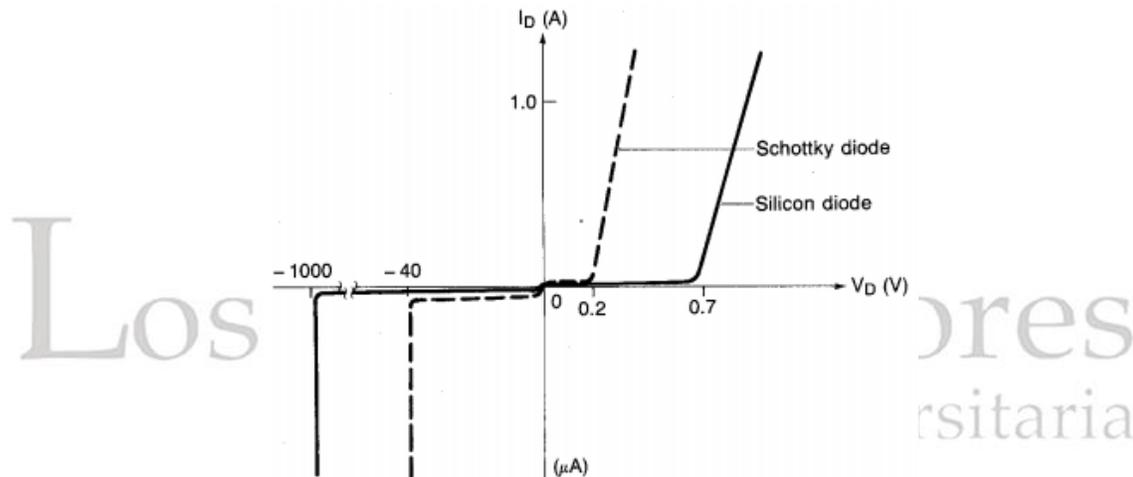


Figura 23 Curva característica del diodo Schottky comparada con un diodo de unión p-n de Si.
Fuente:(Sanchez, n.d.).

6.6 Sensores para aplicaciones en redes WSN

Un sensor es un dispositivo que tiene la capacidad de recibir una señal del medio y transfórmala en una señal que podemos cuantificar o medir dependiendo de un parámetro o escala establecido.

En la actualidad hay una gran cantidad de sensores para distintas aplicaciones, por ejemplo podemos encontrar sensores de temperatura, sensores de humedad, de posición, ultrasonido, de presión, de movimientos, entre muchos otros.

En el presente trabajo se utiliza un sensor de humedad y temperatura modelo DHT22.

6.6.1 Sensor de temperatura y humedad DHT22 (AM2302)

En el presente proyecto se utiliza un sensor DHT22 el cual nos permite medir la temperatura y la humedad al mismo tiempo y es compatible con el NodeMCU.

El DHT22 es un sensor digital de temperatura y humedad, el cual se compone de un termistor y un sensor capacitivo para medir la humedad.

El sensor tiene tres pines dos de alimentación y uno para el envío de los datos, en la tabla 9 se muestran sus especificaciones técnicas.



Figura 24 Sensor DHT22

Parámetro	Medida
Modelo	DHT22
Voltaje de operación	3.3V -6V
Rango de operación	Humedad 0-100%RH, Temperatura -40°C-80°C
Precisión	±2% RH(max ±5%RH); temperatura <±0.5°C
Periodo de muestreo	2s
Corriente de operación	Medición: 1-1.5mA; Standby: 40-50µA

Tabla 9 Especificaciones técnicas del sensor DHT22. Fuente: (DHT22, 2015)

Durante la transmisión el sensor envía una cadena de datos de 40 bits, donde obtenemos la temperatura y la humedad.

El sensor lleva incorporado un microcontrolador el cual se comunica con cualquier microcontrolador externo de la siguiente forma:

- Se inicia la comunicación
- El sensor responde estableciendo un nivel bajo de 80µs y un nivel alto de 80 µs
- El sensor envía 5 bytes con la información de temperatura y humedad.

Su única gran desventaja es que solo puede enviar datos cada 2 segundos, pero para la aplicabilidad en este proyecto no es relevante esta observación.

6.7 Ciclo de trabajo (duty cycle) de un nodo WSN

Para el ahorro de energía en el funcionamiento de un nodo WSN en la mayoría de las aplicaciones, estos dispositivos se encuentran en un modo dormido el 99% del tiempo, en este modo el consumo de corriente es muy bajo alrededor de los microamperios, luego gracias a un temporizador despiertan y se activan para la transmisión de los datos (Naveen & Manjunath, 2011).

La grafica del consumo de corriente de un nodo WSN típico con un ciclo de activación cada cinco minutos lo podemos ver en la figura 25.

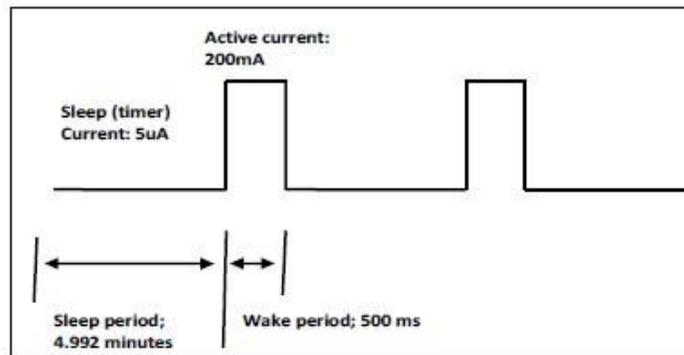


Figura 25 Ciclo de trabajo típico de un nodo WSN. Fuente: (Naveen & Manjunath, 2011)

De esta forma el ciclo de trabajo de un nodo es la relación que existe entre el tiempo en que el nodo está en estado activo y el periodo total en estado activo y dormido.

$$D = \frac{t}{T} * 100$$

Ecuación 18. Ciclo de trabajo nodo WSN

Donde, D: es el ciclo de trabajo, t: es el tiempo en el que el nodo está en modo activo, T: es el periodo de modo activo + modo dormido.

7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La utilización de tecnología de redes WSN en múltiples aplicaciones se ha visto limitada por los siguientes factores:

- Costo de un nodo en una WSN
- Energía de consumo de un nodo en una WSN

7.1 Costo de un nodo WSN

La mayoría de los nodos en una WSN que se utilizan hoy en día para distintas aplicaciones tienen un costo elevado en el mercado lo que limita su uso en aplicaciones donde se suele utilizar cientos de ellos para crear la red de comunicación inalámbrica.

La ventaja que tienen los nodos que se utilizan normalmente en aplicaciones WSN a nivel mundial comparados con el NodeMCU que utilizamos en este proyecto es que tienen un menor consumo energético y mayor rango de distancia de comunicación, pero en cuanto al costo la diferencia es muy grande, por ejemplo, uno de los motes más utilizados es el TmoteSky su precio en el mercado actualmente es de unos 80€ y el costo de un NodeMCU es de 5€, es decir con la compra de un TmoteSky podemos comprar 16 NodeMCU, cantidad necesaria para crear una topología de red WSN.

7.2 Energía de un nodo WSN

Por lo general todos los nodos WSN funcionan con pilas AA alcalinas lo que reduce su vida útil, por ello se han realizado múltiples investigaciones para mejorar la eficiencia energética de estos dispositivos, una de estas soluciones se ha centrado en reducir su ciclo de trabajo (Naveen & Manjunath, 2011), es decir colocarlo en modo standby mientras no estén transmitiendo datos, también se ha intentado la utilización de protocolos de comunicación y enrutamiento de datos más eficientes que reduzcan el consumo (Bruneo et al., 2010), pero el inconveniente prevalece ya que las pilas alcalinas tienen un tiempo de vida muy corto y con el tiempo estas deben ser reemplazadas.

El problema surge cuando estos dispositivos son instalados en sitios remotos de difícil acceso (Lee et al., 2016) y el reemplazo de las baterías no es una tarea fácil lo que conlleva a altos costos de mano de obra y mantenimiento de redes WSN.

Es por ello que en este proyecto se brinda una solución a esta problemática al diseñar un sistema de recolección de energía solar para lograr la autonomía energética de estos dispositivos y lograr una mayor vida útil y aplicabilidad.

Este proyecto fue desarrollado en la ciudad de Bogotá, donde se realizaron las pruebas con el panel solar para establecer las características de curva I-V que nos entrega el panel y las pruebas de carga-descarga de las baterías que alimentan al NodeMCU v1.0/V3.

El primer paso fue determinar la corriente y potencia que consume el NodeMCU v1.0/V3 para ello utilizando equipos de medición de alta precisión como osciloscopios y multímetros, se pudo determinar la corriente del nodo en modo activo y modo sleep dados en (ESP8266 Datasheet, 2015).

Para ello se colocó una resistencia de un valor nominal de 1Ω con una medida de $1.10\Omega \pm 5\%$ en serie a la fuente de alimentación, como aparece en el esquemático de la figura 27 y con la ayuda de un osciloscopio marca Rigol (modelo DS1052E), se midió la caída de tensión en la resistencia, dato con el cual se puede determinar de forma aproximada la corriente media que consume el NodeMCU en modo activo.

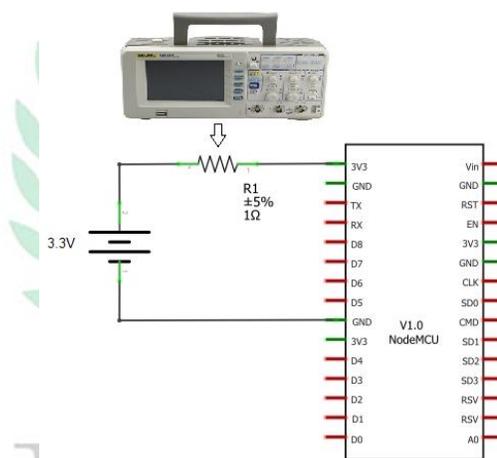


Figura 27 Medición de corriente de NodeMCU. Fuente: autor

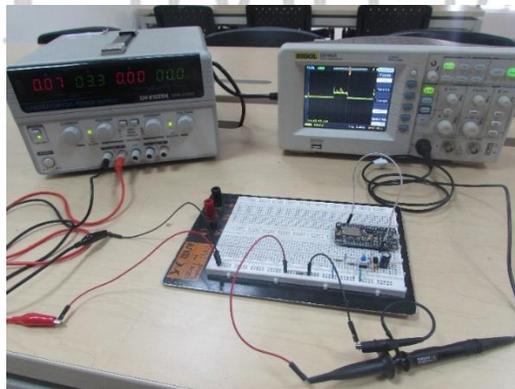


Figura 28 Medición de corriente de NodeMCU. Fuente: autor

Ya que por medio de la ley de Ohm tenemos:

$$I = \frac{V}{R}$$

Ecuación 19 Ley de Ohm

Como la resistencia es de 1Ω tenemos que:

$$I = V$$

También se calculó la corriente utilizando el siguiente método que fue cargar las baterías a un nivel máximo y se mide el periodo que permanece en funcionamiento el NodeMCU.

Después de haber determinado la corriente se calcula la potencia y la energía que consume el nodo en diferentes ciclos de trabajo.

Luego el siguiente paso fue determinar la energía que las baterías Ni-MH seleccionadas pueden suministrar.

Para poder obtener la gráfica de carga y descarga de la batería se conectaron las pilas a un divisor de voltaje por medio de dos resistencias de $10K\Omega$ y a través del pin ADC del NodeMCU se registra el voltaje de las baterías Ni-MH, luego se programa al NodeMCU por medio del IDE de Arduino para que envíe el registro de voltaje de las baterías a la aplicación ThingSpeak y se puede visualizar la gráfica de carga y descarga en tiempo real.

Se determinó las características del panel solar, esto se realiza gracias a las características dadas por el fabricante, y también se determinó la curva I-V del panel en distintas condiciones climáticas como son nublado, soleado y lluvioso.

De esta forma gracias a los datos anteriores de potencia del NodeMCU, se realizó el diseño del sistema de recolección de energía solar el cual cuenta de un panel solar y baterías Ni-MH para el almacenamiento, un diodo Schottky 1n5819 por su baja caída de voltaje umbral y evitar la corriente inversa hacia el panel, así como también el diseño de un sistema de regulación para que el dispositivo funcione de acuerdo al voltaje de entrada requerido (ESP8266 Datasheet, 2015).

El diseño final del sistema de recolección de energía solar para lograr la autonomía energética del NodeMCU lo podemos observar en la figura 29.

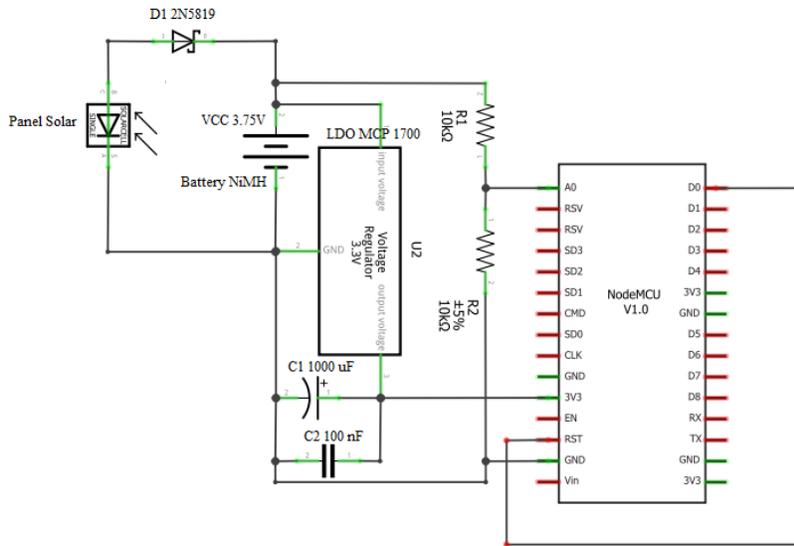


Figura 29 Esquemático del sistema de recolección de energía

Por último, se llevaron a cabo las pruebas de funcionamiento del sistema de recolección de energía, así como la aplicabilidad al registrar la temperatura ambiente del hogar donde se realizaron las mediciones.

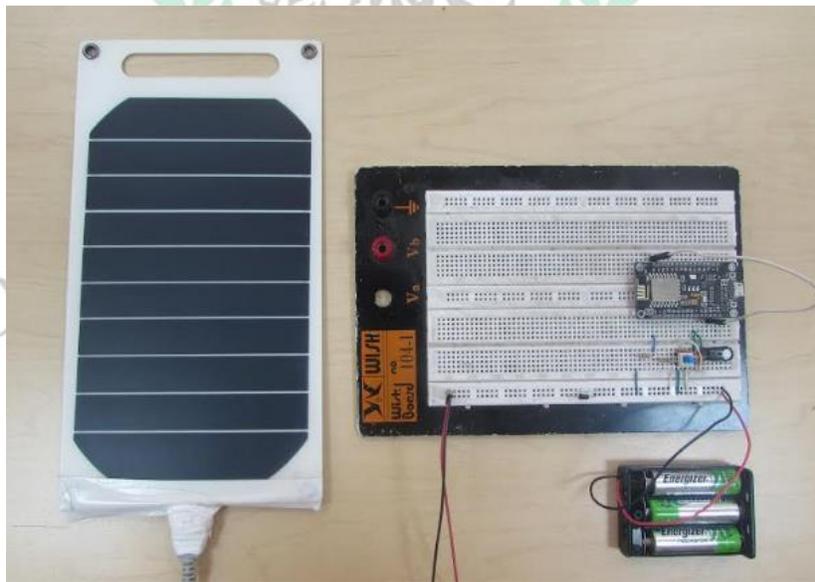


Figura 30 Montaje experimental del sistema de recolección de energía a NodeMCU. Fuente: autor.

9 ALCANCES Y LIMITACIONES

El objetivo de este proyecto fue el diseño de un sistema de recolección de energía solar para lograr la autonomía energética de un NodeMCU para incentivar el uso de estos dispositivos en muchas aplicaciones IoT en Colombia.

Hoy en día estos dispositivos tiene poco uso en aplicaciones de redes WSN por lo que no son muy eficientes en términos energéticos ya que si lo comparamos con otro tipos de nodos que se utilizan en redes WSN su consumo energético es muy alto.

Por ello al lograr la autonomía energética de estos nodos por medio de un sistema de recolección de energía con paneles solares se puede aprovechar todo el potencial en el uso de estos dispositivos para diferentes aplicaciones IoT en Colombia.

En Colombia la adquisición a nivel comercial de integrados, dispositivos y componentes electrónicos de alta calidad y con tecnología de punta para el diseño de sistemas de alta eficiencia son muy difíciles de conseguir, por lo general, para la adquisición de componentes electrónicos como por ejemplo convertidor DC-DC boost, paneles solares, seguidores MPPT o supercapacitores de alto rendimiento se deben encargar por aplicaciones extranjeras de comercio electrónico como e-bay, Amazon, Ali-express entre otros, y muchas veces estos componentes no llegan en tiempo cortos, lo que dificulta el diseño de circuitos de alta calidad.

El desarrollo de este proyecto se realizó en la ciudad de Bogotá, donde las condiciones climáticas, con días completamente nublados, limitan un poco el potencial que nos puede entregar el panel solar, pero aun así, se logró el diseño del sistema de recolección de energía solar y su autonomía energética del nodo.

Los Libertadores
Fundación Universitaria

10 ANALISIS DE RESULTADOS

10.1 Calculo de la energía

10.1.1 Calculo de la energía que consume el NodeMCU v1.0/V3

Según la hoja de datos del ESP-12E la corriente de operación del módulo es de aproximadamente 80mA (ESP12-E Datasheet, 2015).

Se realizaron varias muestras con un osciloscopio de precisión marca Rigol (modelo DS1052E_Serie DS100E), donde se pudo determinar la corriente promedio que consume el NodeMCU v1.0/V3 en modo activo (microcontrolador + transceptor activo) al medir la caída de tensión en la resistencia de valor nominal de $1.1 \pm 5\% \Omega$ que está en serie con la fuente de alimentación y el nodo:

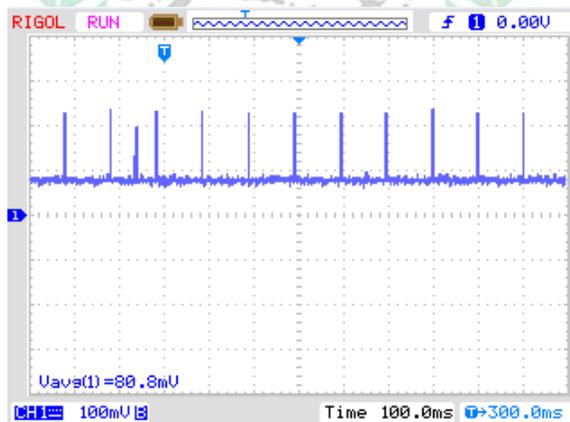


Figura 31 Valor medio de corriente que consume el NodeMCU en modo activo

Como podemos observar en la figura 31 el osciloscopio midió una caída de tensión en la resistencia de 1Ω de un valor medio de 80.8mA, con lo cual podemos ver que es un valor muy parecido al valor dado por la hoja de datos.

En la gráfica 31 podemos observar unos picos de voltaje que van hasta aproximadamente 230mA con una frecuencia de 10Hz, estos picos son producidos por el modulo conversor USB serial y también por el módulo Wi-Fi al enviar los datos, para eliminarlo se necesita un condensador de desacoplamiento.

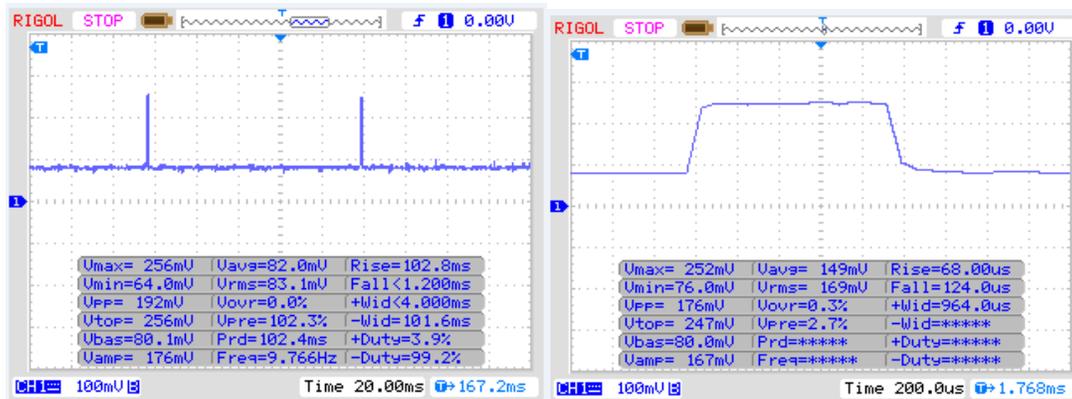


Figura 32 Pulsos que genera el NodeMCU en modo activo

La longitud de estos pulsos es de aproximadamente 1 ms, por lo que no interfiere en gran medida con el valor medio de la corriente.

En un video que realizo el señor Kevin Darrah, explica como eliminar esos picos con condensadores de desacoplamiento (Darrah, 2016).

Como ya sabemos que el voltaje de operación del NodeMCU es de 3.3V entonces la potencia de funcionamiento del NodeMCU es aproximadamente igual:

$$P = 80\text{mA} \times 3.3\text{V} = 264\text{mW}$$

Ecuación 20 Potencia de consumo NodeMCU

De esta forma la energía utilizada por el NodeMCU v1.0/V3 durante un día completo será:

$$E = 264\text{mW} \times 24 \times 3600 = 22809.6 \text{ J/día}$$

Ecuación 21 Consumo de energía de NodeMCU durante 1 día.

10.1.2 Calculo de la energía suministrada por las baterías

Calculamos cuanto energía puede suministrar las baterías de Ni-MH con capacidad de 1300mAh y un voltaje nominal de 3.75V, por lo tanto la energía total que las baterías pueden suministrar es de:

$$B = 1300\text{mA} \times 60 \times 60 \times 3.75\text{V} = 17550 \text{ J}$$

Ecuación 22 Energía que suministran las baterías Ni-MH

La duración de la batería al suministrar la energía al nodo puede ser calculada de la siguiente forma:

$$T_b = B/E = 17550/22809.6 = 0.76 \text{ días}$$

Ecuación 23 Tiempo que dura la batería alimentando al NodeMCU a un ciclo de trabajo del 100%

Que es igual a 18.2 horas aproximadamente.

Se realizó la prueba al cargar la batería a su máxima carga y verificar cuanto tiempo duro en funcionamiento el NodeMCU, esto se realizó por medio de la plataforma ThingSpeak, en la figura 33 podemos observar los resultados:

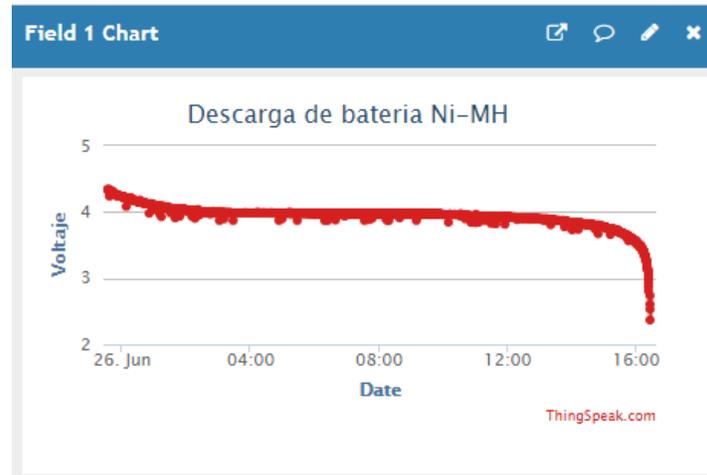


Figura 33 Curva de descarga de baterías Ni-MH al alimentar el NodeMCU en modo activo

En la prueba experimental la batería duro alimentando al NodeMCU durante 17 horas.

Como podemos observar en la prueba experimental registrado en la figura 33 la batería duro menos tiempo que el cálculo teórico esto puede ser causado por el número de ciclos de carga y descarga que las baterías han tenido por múltiples pruebas que se han realizado en el desarrollo del presente proyecto y han perdido un poco su capacidad nominal, otra de las razones puede ser bajas temperaturas durante la prueba y variaciones en la potencia de consumo del NodeMCU.

10.1.3 Calculo de la energía proporcionada por el panel solar

Para el cálculo de la energía que proporciona el panel solar se deben de tener en cuenta tres condiciones climáticas las cuales son nublado, soleado y lluvioso.

Para cada una de las tres condiciones climáticas se realizaron varias mediciones con el fin determinar los promedios de energía que nos proporciona el panel para cargar a las baterías.

Para ello con la ayuda de las características dadas por el fabricante y al realizar distintas mediciones con la ayuda de multímetros se pudo determinar la curva I-V del panel solar en distintas condiciones climáticas.

Marca	Sin marca / Genérico
Tipo de células solares	Silicio monocristalino
Potencia	6W
Solar Output	USB 5V 1200mAh
Item size:	26 * 14cm /10.23 * 5.51in(L * W)
Item weight:	102g /3.56oz

Tabla 10 Características técnicas dadas por el fabricante. Fuente: <https://www.ebay.com/itm/Solar-Charger>.

Cabe resaltar que las características dadas en la tabla 10 son en condiciones de máxima irradiancia es decir a una irradiancia de $1000W/m^2$ a una temperatura de $25^{\circ}C$ y AM 1.5.

Para lograr la curva I-V del panel solar en distintas condiciones climáticas, se conectó un potenciómetro de $5k\Omega$ a las terminales del panel solar para simular una carga y con la ayuda de dos multímetros uno que media el voltaje y al mismo tiempo el otro media la corriente se obtuvieron distintas curvas I-V a lo largo del día para determinar un promedio de la máxima potencia que entrega los panel en distintas condiciones climáticas.

En la figura 31 podemos observar una de las curvas obtenidas por medio de este procedimiento en un periodo comprendido entre el 20 de mayo y 5 de junio de 2018.

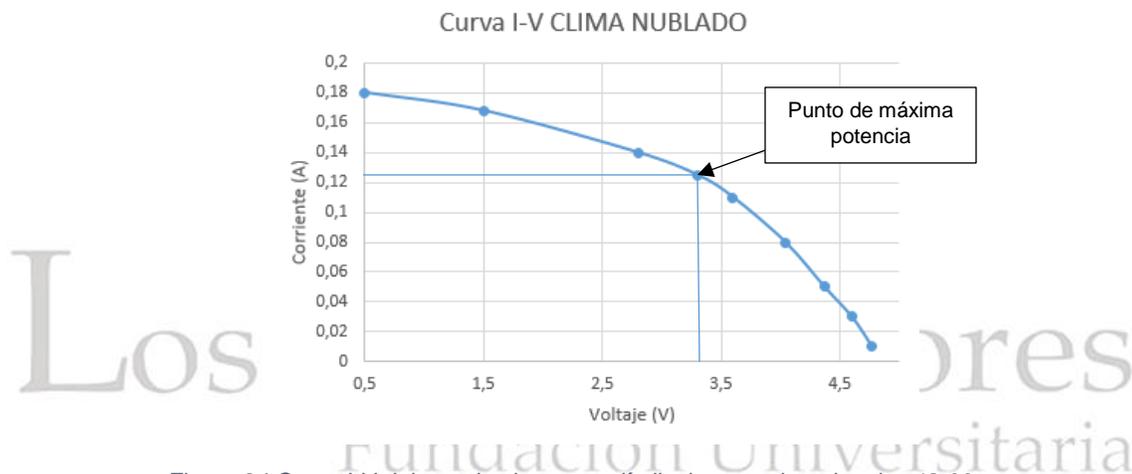


Figura 34 Curva I-V del panel solar en un día lluvioso registrado a las 12:00 pm.

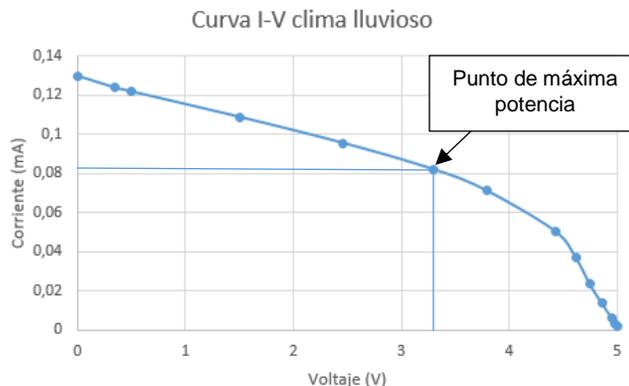


Figura 35 Curva I-V del panel solar en un día nublado registrado a las 4:00 pm.

Clima	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Corriente Isc (mA)	Voltaje (Voc)
Nublado	3,3	148	250	5.06
Soleado	3,2	230	580	5.06
Lluvioso	3,3	70	130	5.06

Tabla 11 Valores obtenidos a las 8:00 am

Clima	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Corriente Isc (mA)	Voltaje (Voc)
Nublado	3,0	180	490	5.06
Soleado	3,0	240	750	5.06
Lluvioso	3,3	80	150	5.06

Tabla 12 Valores obtenidos a las 12:00 pm

Clima	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Corriente Isc (mA)	Voltaje (Voc)
Nublado	3,3	125	180	5.06
Soleado	3,2	200	400	5.06
Lluvioso	3,3	67	120	5.06

Tabla 13 Valores obtenidos a las 3:30 pm

Calculamos la potencia que nos puede entregar el panel en las peores condiciones que se pueden presentar que es con 6 horas de clima lluvioso y 3 horas en clima nublado, el resto del día es de noche y no se recolecta la energía.

$$S = [(3,2 \times 0,151 \times 3) + (3,12 \times 0,220 \times 0) + (3,3 \times 0,072 \times 6)] \times 3600$$

$$S = 10350.2 \text{ J}$$

Ecuación 24 Energía entregado por el panel solar durante 1 día

Por lo tanto el tiempo que toma el panel solar en cargar completamente las baterías es de:

$$T_c = B/S = 17550/10350.2 = 1.69 \text{ días.}$$

Ecuación 25 Tiempo que dura el panel solar en cargar las baterías

Los cálculos de energía muestran que el panel solar requiere de 1.69 días para cargar completamente las baterías, pero hay un inconveniente y es que las baterías pueden alimentar el nodo sin recibir carga durante 18.2 horas.

Para que el sistema sea sostenible debemos colocar el NodeMCU en modo sleep durante cierto tiempo para reducir la energía que consume el NodeMCU.

10.1.4 Calculo de energía del NodeMCU en modo sleep

Una de las ventajas que tiene el NodeMCU v1.0/V3 es que tiene varios estados de funcionamiento para el ahorro energético.

Uno de los modos de mayor ahorro energético es en el modo deep sleep según la hoja de datos el módulo ESP-12E, en modo Deep sleep tiene un consumo de alrededor de 20 μ A, pero al estar conectado a la placa de NodeMCU v1.0/V3 el consumo varía mucho debido a que el regulador de 3.3V (AMS 1117) y el modulo conversor USB-serial (CH340) que lleva incorporado el NodeMCU v1.0/V3, consumen energía durante el modo Deep sleep ocasionado que la corriente en este modo aumente a 2mA aproximadamente.

En este modo el NodeMCU tiene un consumo muy bajo de energía ya que solo funciona el reloj en tiempo real (Real Time Clock o RTC), que es el que envía la señal para que se pueda reiniciar el microcontrolador, cuando haya finalizado la cuenta regresiva del tiempo que haya establecido en el código.

En la placa NodeMCU el pin D0 (GPIO16) es el que envía la señal de reset para que se pueda reiniciar el microcontrolador cuando finaliza el tiempo de estar en suspenso en la figura se puede observar cómo se realiza la conexión para que el NodeMCU pueda salir del modo Deep sleep.

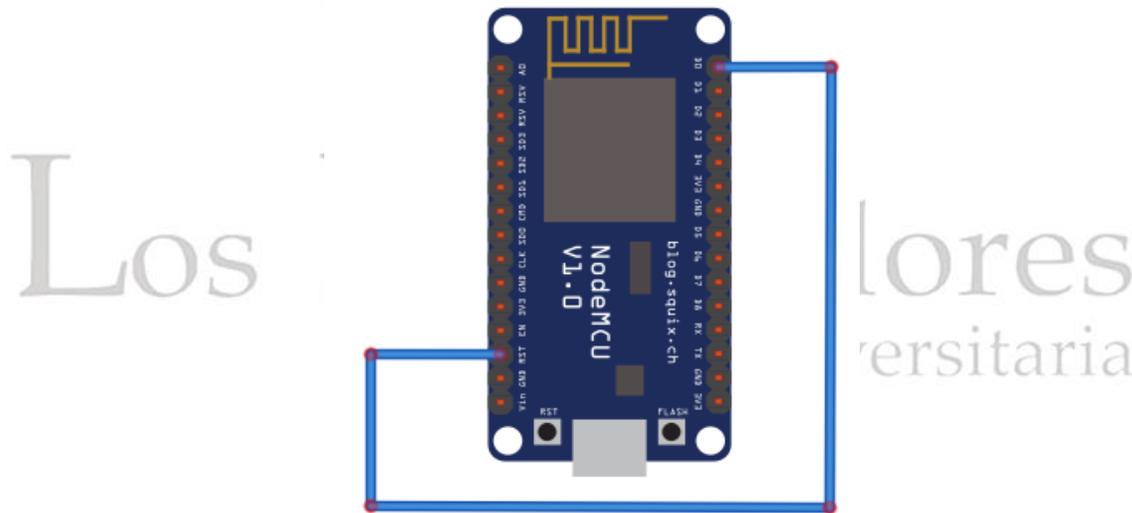


Figura 36 Configuración de NodeMCU en modo sleep. Fuente: Autor

En este proyecto el tiempo en que el NodeMCU permanecerá en modo sleep será de 20 segundos, luego cuando el nodo despierta y envía el dato de voltaje de las baterías, el tiempo en que el nodo se demora en establecer la conexión de internet y enviar el dato es de 12 segundos aproximadamente.

Por lo tanto el ciclo de trabajo en el que trabajará el NodeMCU está dado por la ecuación 26.

$$D = \frac{12}{32} * 100 = 37.5\%$$

Ecuación 26 Ciclo útil de funcionamiento del NodeMCU

En la tabla 14 se registran algunos ciclos de trabajo con el que podemos trabajar con el NodeMCU y sus valores promedio de potencia que consumirían en esos ciclos con la alimentación de baterías Ni-MH de 1300mAh y voltaje nominal de 3.75V.

Ciclo útil (%)	Tiempo sleep	Corriente (mA)	Potencia (mW)	Duración (días)
0.27	71' 30"	2.2	7.31	27.7
10	108"	9.8	32.3	6.28
30	28"	20	66	3
50	12"	41	135.3	1.50
100	0	80	264	0.76

Tabla 14 Valores de consumo en distintos ciclos de trabajo

Para un ciclo de trabajo de 37.5% y 80mA en modo activo (microcontrolador + transceptor activos), y un consumo de 2mA en modo sleep, el consumo medio del sistema sería de 31.2 mA.

El valor anterior fue comprobado por medio de un osciloscopio por medio del esquemático mostrado en la figura 37.

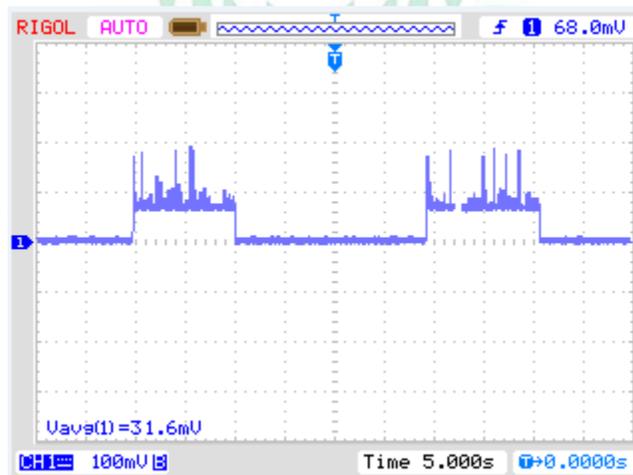


Figura 37 Valor medio de corriente de NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%

La potencia de funcionamiento del NodeMCU con este ciclo de trabajo sería:

$$P = 3.3V * 31.2mA = 103.1mW$$

Ecuación 27 Potencia de consumo de NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%

De esta forma la energía utilizada por el NodeMCU durante un día completo será:

$$E = 103.1 mW * 24 * 60 * 60 = 8910 J/día$$

Ecuación 28 Energía de consumo del NodeMCU durante 1 día a un ciclo de trabajo de 37.5%

La duración de la batería al suministrar la energía al nodo puede ser calculada de la siguiente forma:

$$T_b = B/E = 17550/8553.6 = 1.96 \text{ días.}$$

Ecuación 29 Tiempo de duración de la batería alimentando al NodeMCU con un ciclo de trabajo de 37.5%

El valor anterior fue corroborado en la gráfica de descarga por medio de la aplicación de ThingSpeak que aparece en la figura 38.

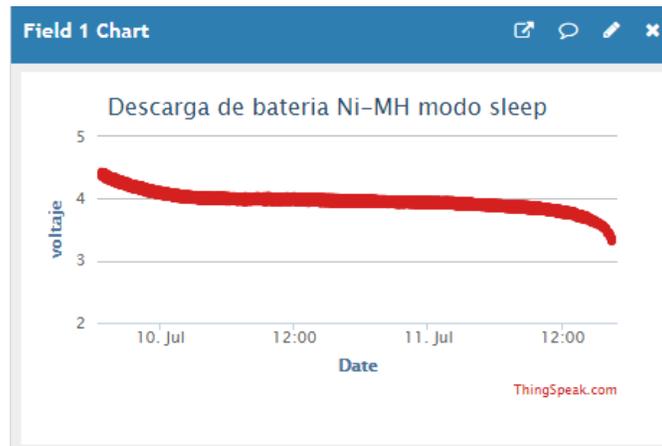


Figura 38 Descarga de batería Ni-MH con un ciclo de trabajo de 37.5%

Las baterías duraron alimentando al NodeMCU durante 1.91 días a un ciclo de trabajo de 37.5% un poco menos del valor calculado como podemos observar en la gráfica 38.

Por lo tanto los cálculos que se realizaron de la energía que proporciona el panel solar nos indica que se requería de 1.69 días para recargar las baterías mientras que las baterías pueden alimentar al NodeMCU sin recibir carga durante 1.91 días en un ciclo de trabajo de 37.5% por lo tanto se concluye que el sistema es sostenible.

10.1.5 Prueba Experimental del sistema de recolección de energía solar para la autonomía energética del NodeMCU

La prueba experimental del funcionamiento del sistema de recolección de energía solar para lograr la autonomía energética del NodeMCU 1.0/V3 se dispuso para una prueba de seis días, en la gráfica 39 se puede visualizar el voltaje de las baterías Ni-MH registrados en la plataforma de ThingSpeak los primeros 3 días del experimento.

Los primeros dos días, fueron días de sol con pocas horas nublado, los siguientes días transcurrieron con pocas horas de sol, con clima nublado y lluvioso.

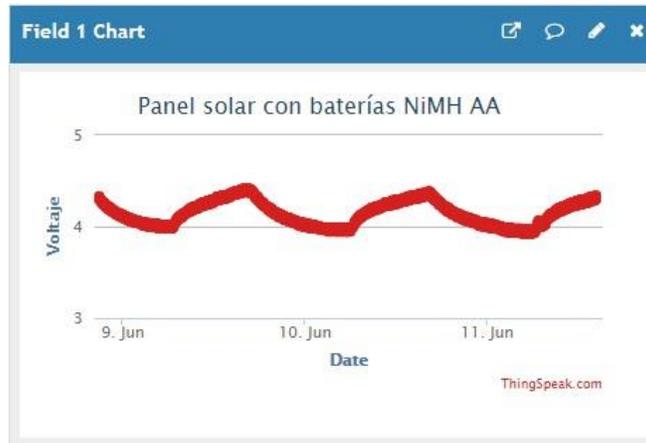


Figura 39 Voltaje de las baterías durante el experimento los primeros 3 días.

En la gráfica 40 se muestra una gráfica más completa del voltaje de las baterías Ni-MH durante los seis días que duro el experimento, podemos observar como es el proceso de carga y descarga de las baterías Ni-MH y como el NodeMCU funciono sin ningún tipo de interrupción durante seis días y 24 horas a pesar de las variaciones climáticas que se dieron.

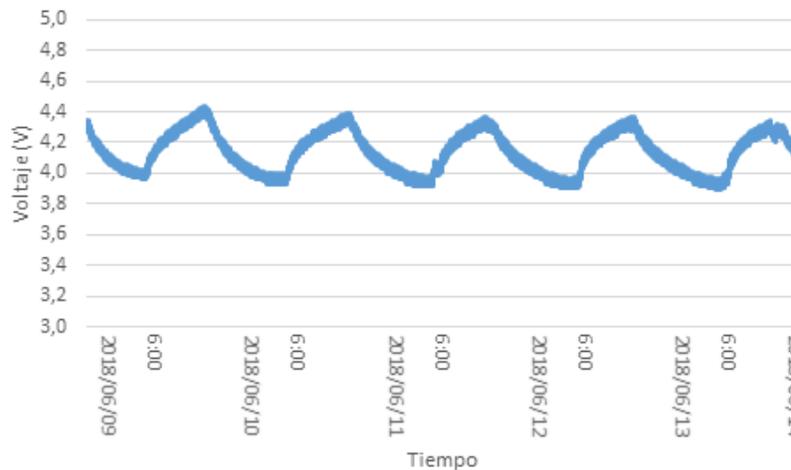


Figura 40 Voltaje de las baterías Ni-MH durante el experimento

En la figura 41 observamos el voltaje de las baterías Ni-MH durante el experimento con un tiempo de muestreo de 24 horas, se puede observar que en los primero tres días, hay una caída con respecto al voltaje inicial, esto se debe a que inicialmente las baterías empezaron funcionando a una carga del 100%, luego en los próximos días se logra una estabilización del voltaje que permite que el NodeMCU funcione perpetuamente hasta que las baterías cumplan con su ciclo de vida útil.

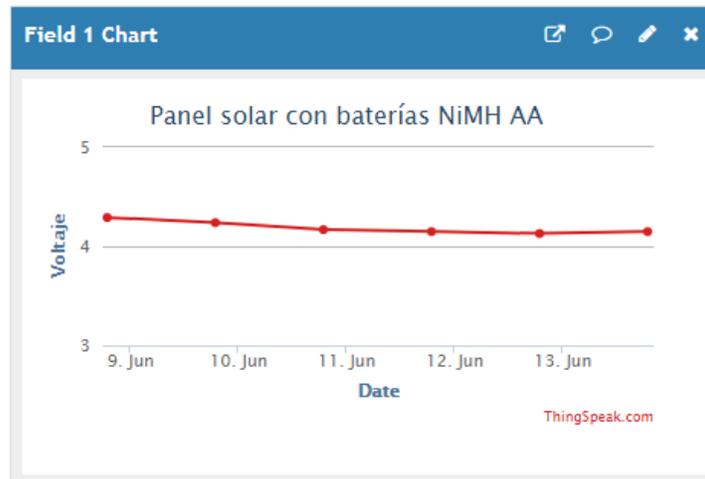


Figura 41 Voltaje de las baterías Ni-MH con una frecuencia de muestreo de 24h

10.1.6 Análisis de curva de carga y descargas de baterías Ni-MH

Las baterías Ni-MH empiezan su proceso de carga a partir de las 6:00 horas con un voltaje inicial de aproximadamente 3.9V que equivale aproximadamente a un 35% de su capacidad de carga, luego el proceso de carga dura aproximadamente hasta las 16:30 horas y llega a un voltaje de aproximadamente de 4.4V que es voltaje máximo de carga.

El rango de carga y descarga se mantiene entre los niveles de 4.4V y 3.9V, esto se debe a que cuando inicia el experimento las baterías están cargadas al 100%.

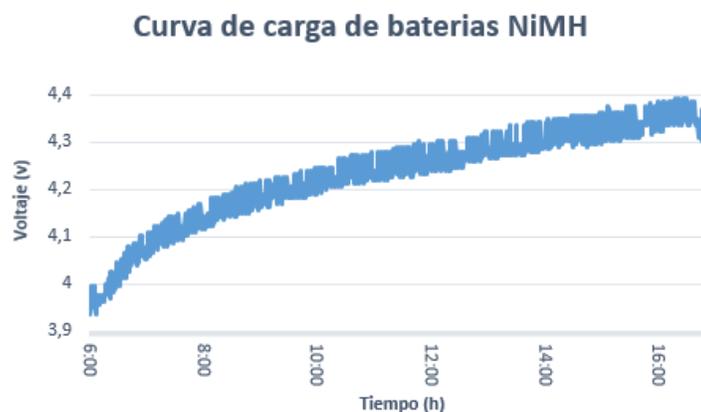


Figura 42 Curva de carga de baterías Ni-MH

Durante el día el panel solar carga las baterías y al mismo tiempo alimenta al NodeMCU y por la noche, las baterías Ni-MH se encargan de alimentar al NodeMCU con la carga que ha sido almacenada.

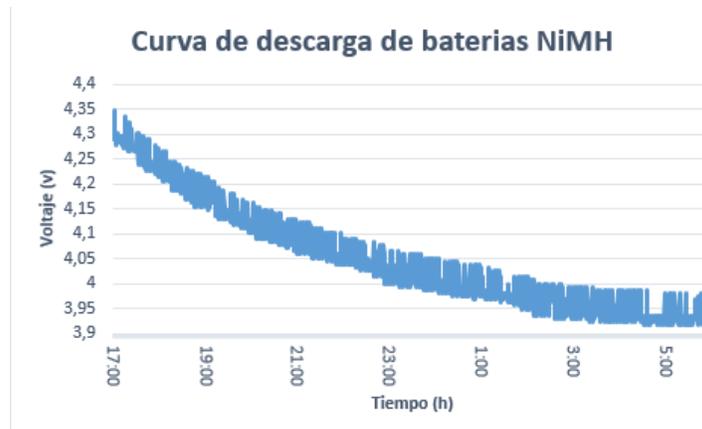


Figura 43 Curva de descarga de baterías Ni-MH

Como podemos observar en la figura 43 la descarga inicia alrededor de las 4:30pm hora que ya no hay sol desde una carga máxima de 4.4V que equivale al 100% y llega a un valor de 3.9 equivalente al 65% de la capacidad de descarga.

10.1.7 Aplicabilidad de NodeMCU como nodo en una red WSN.

Para observar la aplicabilidad del sistema de recolección de energía para la autonomía energética de un NodeMCU en un caso real se monitoreo la temperatura de una habitación con un sensor DHT22 conectado a la placa, y al mismo tiempo se monitorea el voltaje de las baterías con un sistema de control de carga controlado por software.

Lo primero que se debe determinar es si al conectar el sensor DHT22, el consumo de energía incrementa y se debe cambiar el ciclo útil de trabajo del nodo.

Para ello nos remitimos a la hoja de especificaciones del sensor DHT22 y verificamos la corriente de funcionamiento mostrado en la tabla 9 donde especifica que el consumo de corriente máximo del sensor es de 1.5mA, se verifica por medio de un multímetro esta corriente y efectivamente el medidor nos genera este valor.

Nuevamente se calcula la potencia de consumo de todo el sistema con un ciclo de trabajo del 37.5% para determinar la energía total.

Ya que sabemos que la corriente de consumo del NodeMCU es de 80mA se suma esta corriente al valor que necesita el sensor DHT22 para funcionar.

Para un ciclo de trabajo de 37.5% y 80mA en modo activo (microcontrolador + transceptor activos) + consumo del sensor 1.5mA, y un consumo de 2mA en modo sleep, el consumo medio del sistema seria de 31.2 mA.

La potencia de funcionamiento del NodeMCU con este ciclo de trabajo seria:

$$P = 3.3V * 31.8mA = 104.9mW$$

De esta forma la energía utilizada por el NodeMCU durante un día completo será:

$$E = 104.9 \text{ mW} \times 24 \times 60 \times 60 = 9070.3 \text{ J/día}$$

La duración de la batería al suministrar la energía al nodo puede ser calculada de la siguiente forma:

$$T_b = B/E = 17550/9070.3 = 1.96 \text{ días.}$$

Por lo tanto los cálculos que se realizaron de la energía que proporciona el panel solar nos indica que se requería de 1.69 días para recargar las baterías mientras que las baterías pueden alimentar al NodeMCU con el sensor DHT22 conectado sin recibir carga durante 1.96 días en un ciclo de trabajo de 37.5% por lo tanto se concluye que el sistema es sostenible.

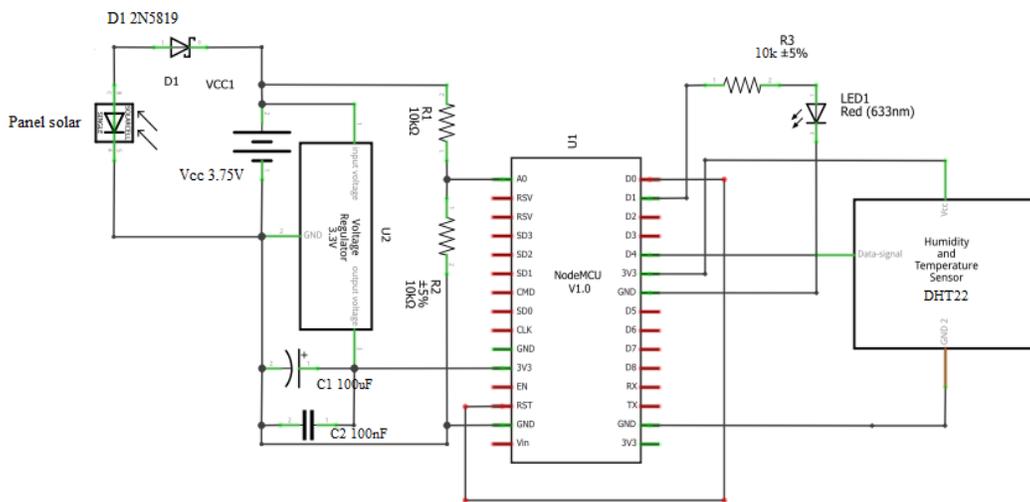


Figura 44 Esquemático de sistema de recolección de energía y sensor de humedad. Fuente: autor



Figura 45 Prototipo de nodo WSN alimentado con un sistema de recolección de energía. Fuente: Autor

10.1.8 Control de carga por software

El diseño de un control de carga y descarga es muy importante en un sistema de recolección de energía solar ya que evita daños en el módulo de almacenamiento de la energía en este caso de las baterías Ni-MH evitando sobrecargas o que el circuito por condiciones del clima en muchos días con poca radiación solar deje de funcionar.

En el presente proyecto se realizó el diseño de un sistema de control de carga y descarga por software, en el que al mismo tiempo en que el nodo toma mediciones de temperatura está monitoreando constantemente el voltaje de las baterías por medio del pin conversor analógico digital ADC del NodeMCU.

En el caso en el que las baterías estén al 100% de carga que en nuestro caso es de 4.4V el sistema cambia su ciclo de trabajo que en este caso es del 37.5% y pasa a un ciclo de trabajo del 100% y al mismo tiempo se enciende un led para visualizar que el sistema está en sobrecarga, de esta forma la energía del nodo aumenta y empieza el procedimiento de descarga de las baterías.

En caso contrario si ha habido muchos días de poca radiación solar, y por condiciones climatológicas no predecibles que pueden provocar que las baterías se descarguen a niveles muy bajos, si el voltaje de las baterías llega a 3.3V el sistema cambia a un ciclo de trabajo de 0.33% lo que conlleva a una corriente de consumo medio de 2.2 mA, que ayuda a que el nodo extienda su vida útil hasta que nuevamente el panel solar cargue a las baterías.

11 CONCLUSIONES

En el presente proyecto se logró la autonomía energética de un NodeMCU v1.0/V3, el cual es un kit de desarrollo open source que lleva incorporado un módulo Wi-Fi ESP-12E el cual permite la comunicación inalámbrica con otros dispositivos.

Por medio de un sistema de recolección de energía solar se logra la autonomía energética de la placa durante seis días en que duro la prueba experimental, en comparación con 1.91 días que duro funcionando con la alimentación con solo las baterías sin ningún tipo de sistema de recolección.

La facilidad en la programación del NodeMCU v1.0/V3 por medio del IDE de arduino y sus distintos modos de ahorro energético hace que este dispositivo sea muy práctico a la hora de utilizarlo en distintas aplicaciones IoT o como nodo de una red WSN.

En próximos trabajos es recomendable implementar mecanismos que ayuden a optimizar la potencia que nos entregan los paneles solares esto se puede hacer utilizando dispositivos MPPT los cuales son circuitos que hacen un seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles.

También es recomendable continuar con investigaciones de sistemas de recolección de energía con sistemas híbridos de baterías y supercapacitores, ya que los supercapacitores por sus múltiples ciclos de carga y descarga pueden ayudar a mejorar el sistema de recolección de energía.

Se espera con este trabajo incentivar el uso de NodeMCU para aplicaciones en redes WSN en Colombia, ya que el diseño funciona perpetuamente hasta que las baterías cumplan con su ciclo útil y a un costo muy bajo sin la necesidad de estar cambiando baterías continuamente.

Los Libertadores
Fundación Universitaria

12 BIBLIOGRAFIA

- Ashton, K. (2009). That “Internet of Things” Thing. *RFID Journal*, 4986. <https://doi.org/10.1145/2967977>
- Boylestad, R. L. (2004). Introducción al análisis de circuitos.
- Bruneo, D., Scarpa, M., Bobbio, A., Cerotti, D., & Gribaudo, M. (2010). Adaptive swarm intelligence routing algorithms for WSN in a changing environment. *Proceedings of IEEE Sensors*, 1813–1818. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2010.5689994>
- Cabrane, Z., Ouassaid, M., & Maaroufi, M. (2016). Analysis and evaluation of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(45), 20897–20907. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.141>
- CATA SANCHEZ, J. E., & RODRIGUEZ SÓCOLA, F. M. (2015). Análisis Matemático De Un Panel Solar Fotovoltaico De Silicio. *Tesis Previa a La Obtencion Del Titulo De Ingeniero Eléctrico*, 113. Retrieved from <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10250/1/UPS-GT001338.pdf>
- Charoenporn, T., Sunate, T., Pianprasit, P., Kesphanich, S., Bunpeng, A., & On-uean, A. (2016). Selection model for communication performance of the bus tracking system. *2016 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICSEC.2016.7859871>
- Chien, L. J., Driberg, M., Sebastian, P., & Hiung, L. H. (2016). A simple solar energy harvester for wireless sensor networks. *2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICIAS.2016.7824104>
- Darrah, K. (2016). *Low Power Arduino! Power Supply Considerations p1*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=sefQcqrDik>
- Description, G., & Description, G. (2007). Low Quiescent Current LDO. *Technology*, 1–24.
- DHT22. (2015). Dht22 (Am2302) Datasheet. *Aosong Electronics Co, Ltd.*, 22, 1–10. Retrieved from <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf> <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>
- Es, Q. U. É., & Atlas, E. L. (2005). ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR, ULTRAVIOLETA Y OZONO DE COLOMBIA. Retrieved from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- ESP12-E Datasheet. (2015). Datasheet: ESP-12E WiFi Module. *Product Datasheet*, 1–18. Retrieved from <http://www.kloppenborg.net/images/blog/esp8266/esp8266-esp12e-specs.pdf>
- ESP8266 Datasheet. (2015). ESP8266EX Datasheet. *Espressif Systems Datasheet*, 1–31.

Retrieved from https://www.adafruit.com/images/product-files/2471/0A-ESP8266__Datasheet__EN_v4.3.pdf

Geschickter, C., & R. Moyer, K. (2016). Measuring the Strategic Value of the Internet of Things for Industries. <https://doi.org/G00298896>

Gómez Maureira, M. A., Oldenhof, D., & Teernstra, L. (2014). ThingSpeak – an API and Web Service for the Internet of Things. *World Wide Web*. Retrieved from http://mediatechnology.leiden.edu/images/uploads/docs/wt2014_thingspeak.pdf%0Ahttps://staas.home.xs4all.nl/t/swtr/documents/wt2014_thingspeak.pdf

Green-Cap(E. (n.d.).

Halper, M., & Ellenbogen, J. (2006). Supercapacitors: A brief overview. *Report No. MP 05W0000272, The ...*, (March), Report No. MP 05W0000272, 1-29. [https://doi.org/Report No. MP 05W0000272](https://doi.org/Report%20No.%20MP%2005W0000272)

Hernández, L. del V. (n.d.). NodeMCU tutorial paso a paso desde cero. Retrieved from <https://programarfacil.com/podcast/nodemcu-tutorial-paso-a-paso/>

Jaffe, S. R. (2016). Design of Inexpensive and Easy To Use DIY Internet of Things Platform, (June). Retrieved from <http://digitalcommons.calpoly.edu/theses/1581/>

Joshi, R., & Zhu, J. (2015). Ambient Energy Harvester Design for a Wireless Sensor Network, 246–250.

Kodali, R. K., & Mandal, S. (2016). IoT based weather station. *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 680–683. <https://doi.org/10.1109/ICCICCT.2016.7988038>

L Boylestad, R., & Nashelsky, L. (1997). Diodos Semiconductores. *Electronica_Teoría_de_circuitos*.

Lee, Y., Blaauw, D., & Sylvester, D. (2016). Ultralow Power Circuit Design for Wireless Sensor Nodes for Structural Health Monitoring. *Proceedings of the IEEE, 104(8)*, 1529–1546. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2547946>

Léone, R., Leguay, J., Medagliani, P., & Chaudet, C. (2015). Tee: Traffic-based Energy Estimators for duty cycled Wireless Sensor Networks, 6749–6754.

Liang, Y. Z., Zhang, A. L., & Li, Y. Z. (2013). An energy-effective routing protocol efficiently constructs cluster topology for WSN. *Proceedings - 3rd International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, IMCCC 2013*, 1097–1100. <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2013.244>

Lineales, R. (2011). ELECTRÓNICA INDUSTRIAL REGULADORES LINEALES :

Manual, A. (2010). Nickel Metal Hydride (NiMH) Nickel Metal Hydride (NiMH), 7323(Table 1), 1–16.

Mouapi, A., Hakem, N., Kandil, N., & Kamani, G. V. (2016). Energy harvesting design for autonomous Wireless Sensors Network applied to trains. *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS, 2016–Novem*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2016.7728636>

- Naveen, K. V, & Manjunath, S. S. (2011). A reliable ultracapacitor based solar energy harvesting system for Wireless Sensor network enabled intelligent buildings. *2nd International Conference on Intelligent Agent & Multi-Agent Systems*, 20–25. <https://doi.org/10.1109/IAMA.2011.6048997>
- Nayak, A., Prakash, G., & Rao, A. (2014). Harnessing wind energy to power sensor networks for agriculture. *Proceedings of the 2014 International Conference on Advances in Energy Conversion Technologies - Intelligent Energy Management: Technologies and Challenges, ICAECT 2014*, 221–226. <https://doi.org/10.1109/ICAECT.2014.6757091>
- NodeMCU. (n.d.). Retrieved from https://www.amazon.com/s/ref=nb_sb_noss/146-9534586-3403116?url=search-alias%3Daps&field-keywords=NodeMCU
- On, A. S., Wireless, T. H. E., & Networks, S. (2014). Un estudio acerca de las redes inalámbricas de sensores.
- Press, G. (2014). *Internet of Things By The Numbers: Market Estimates And Forecasts*. Retrieved from <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2014/08/22/internet-of-things-by-the-numbers-market-estimates-and-forecasts/#23f03999b919>
- Prinyakupt, J., & Yootho, T. (2017). Multichannel temperature monitor on IoT. *BMEiCON 2016 - 9th Biomedical Engineering International Conference*, 0–3. <https://doi.org/10.1109/BMEiCON.2016.7859623>
- Raghunathan, V., Kansal, A., Hsu, J., Friedman, J., & Srivastava, M. B. (2005). Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems. *Information Processing in Sensor Networks, 2005. IPSN 2005. Fourth International Symposium On*, 457–462. <https://doi.org/10.1109/IPSN.2005.1440973>
- Reguladores de voltaje de circuito integrado. (n.d.).
- Rivera Flores Norma Rosario, D. R. M. Á. (2015). “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.” 82. Retrieved from [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis MER Norma Rosario Flores Rivera y Mioguel Ángel Dominguez Ramírez.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/215/1/Tesis%20MER%20Norma%20Rosario%20Flores%20Rivera%20y%20Miguel%20Ángel%20Dominguez%20Ramírez.pdf)
- Rodr, W. F., & Fonseca, A. (2015). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS SUPERCONDENSADORES DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ELECTRONIC TEST BENCH FOR THE CHARACTERIZATION OF SUPERCAPACITORS.
- Rose, K., Eldridge, S., & Chapin, L. (2015). The Internet Of Things: An Overview. *The Internet Society*, (October), 80. <https://doi.org/10.5480/1536-5026-34.1.63>
- Sanchez, E. (n.d.). A.1. El diodo. *Universidad de Valencia*, 1–21.
- Saucedo García, J. (2010). Diseño De Un Cargador De Bateria Li-Ion Para Obtener La Maxima Potencia De Un Panel Solar, 1–70. Retrieved from http://www2.uacj.mx/IIT/IEC/Digitales/PROYECTOS/Documentos_junio_2010/DISEÑO DE UN CARGADOR DE BATERIA LI-ION PARA OBTENER LA MAXIMA POTENCIA DE UN PANEL SOLAR.pdf
- Senivasan, S., Drieberg, M., Singh, B., Singh, M., Sebastian, P., & Hiung, L. H. (2017). An MPPT Micro Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Networks. *IEEE 13th*

International Colloquium on Signal Processing & Its Applications, (March), 10–12.

Shkurti, L. (2017). Development of Ambient Environmental Monitoring System Through Wireless Sensor Network (WSN) Using NodeMCU and “ WSN Monitoring ,” (June), 11–15.

Shwe, H. Y., Han, P., & Chong, J. (2015). WSN-based Energy-Efficient Data Communication Protocol for Smart Green Building Environment, 288–292.

Škraba, A., Koložvari, A., Kofjač, D., Stojanović, R., Stanovov, V., & Semekin, E. (2017). Prototype of group heart rate monitoring with NODEMCU ESP8266. *2017 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO 2017 - Including ECYPS 2017, Proceedings*, (June). <https://doi.org/10.1109/MECO.2017.7977151>

Taneja, J., Jeong, J., & Culler, D. (2008). Design, modeling and capacity planning for micro-solar power sensor networks. *Proceedings - 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2008*, 407–418. <https://doi.org/10.1109/IPSN.2008.67>

Tubiello, F., Poehls, L., Webber, T., Marcon, C., & Vargas, F. (2018). A Path Energy Control Technique for Energy Efficiency on Wireless Sensor Networks. *2018 IEEE 9th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)*, 1–4.

Vargas, T., & Abrahamse, A. (2014). an Open-Source Hardware I-V Curve Tracer for Monitoring Pv Output in Bolivia. *Investigación & Desarrollo*, 1(14), 100–116.

Vergara, M. (n.d.). Tecnología de Baterías, 1–2.

Viera Pérez, J. C. (2003). *CARGA RÁPIDA DE BATERÍAS DE Ni-Cd Y Ni-MH DE MEDIA Y GRAN CAPACIDAD. ANÁLISIS, SÍNTESIS Y COMPARACIÓN DE NUEVOS MÉTODOS.*

Zeljami, K. (2013). Caracterización y Modelado de Dispositivos Semiconductores Para Uso en Sistemas de Telecomunicaciones a Frecuencias de Terahercios. *Universidad de Cantabria*.

Fundación Universitaria

13 ANEXOS

13.1 Resultados de circuitos de conmutación con baterías Ni-MH y supercapacitores

13.1.1 Calculo de la energía almacenada por el supercapacitor

Inicialmente se calculó la energía que podría suministrar el supercapacitor al NodeMCU, para las pruebas se utilizaron dos supercapacitores marca Green Cap de 100 Faradios con un voltaje nominal de 2.7V conectados en serie.

Por medio de la ecuación 13 obtenemos:

$$E = \frac{1}{2}(50F)(5.4V^2 - 3.3V^2)$$

$$E = 456.8J$$

La tolerancia en la capacitancia nominal mostrado en la hoja de datos ("Green-Cap(E," n.d.) es de $\pm 20\%$ tiene un efecto considerable en la energía almacenada, por ello la energía almacenada está en el rango de 365.4J – 548.2J

Pasamos el valor de esta energía a Wh:

$$E = 0.126Wh$$

La energía del NodeMCU en Wh es de:

$$E = 0.264Wh$$

Teniendo estos dos valores se puede determinar el tiempo que los supercapacitores pueden alimentar al NodeMCU en modo activo (microcontrolador+transceiver activos)

$$t = 0.126Wh/0.264W = 0.5h$$

Lo que equivale a 30 minutos aproximadamente.

Se realiza las pruebas por medio de la plataforma de ThingSpeak para visualizar la gráfica de voltaje vs tiempo.



Figura 46 Descarga de supercapacitor de 50F alimentando al NodeMCU

El tiempo que el supercapacitor duro alimentando al NodeMCU fue de veinte minutos 10 minutos menos que el calculado teóricamente.

Esto se debe a que el supercapacitor adquirido tiene una tolerancia con respecto a la capacitancia nominal de $\pm 20\%$.

Luego de verificar el comportamiento del supercapacitor alimentando al NodeMCU se dispuso a realizar varias pruebas con el circuito de conmutación mostrado en la figura 26 y se obtuvieron los siguientes resultados.

13.1.2 Calculo de la energía proporcionada por las baterías Ni-MH

Para la prueba se utilizaron cuatro baterías Ni-MH marca Energizer modelo NH-15 de voltaje nominal de 1.25V y una capacidad de 1300mAh.

Las baterías duraron alimentando al NodeMCU durante 1 día y 5 horas.

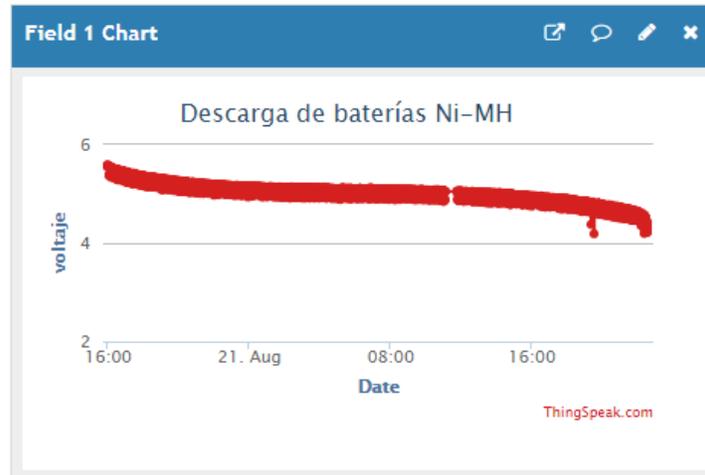


Figura 47 Descarga de baterías Ni-MH alimentando al NodeMCU.

13.1.3 Resultados de sistemas de conmutación de baterías y supercapacitores

Luego de múltiples pruebas del sistema de conmutación por el cual el arduino por medio de una salida PWM con diferentes periodos de ciclo útil de trabajo programados en arduino que cortocircuitaban un relay, con el fin de que las baterías cargaran a los supercapacitores en los pulsos altos y cuando los pulsos eran bajos estos alimentaban al NodeMCU para así minimizar el desgaste energético de las baterías y estas pudieran alimentar por mucho más tiempo al nodo, se obtuvieron los siguientes resultados:

El máximo tiempo que se obtuvo alimentando al NodeMCU con el sistema de conmutación de baterías y supercapacitores con un ciclo útil de trabajo de una señal PWM de 99.2% (180s en alto y 15s en bajo) es un tiempo de alimentación de 1 día y 20 minutos.

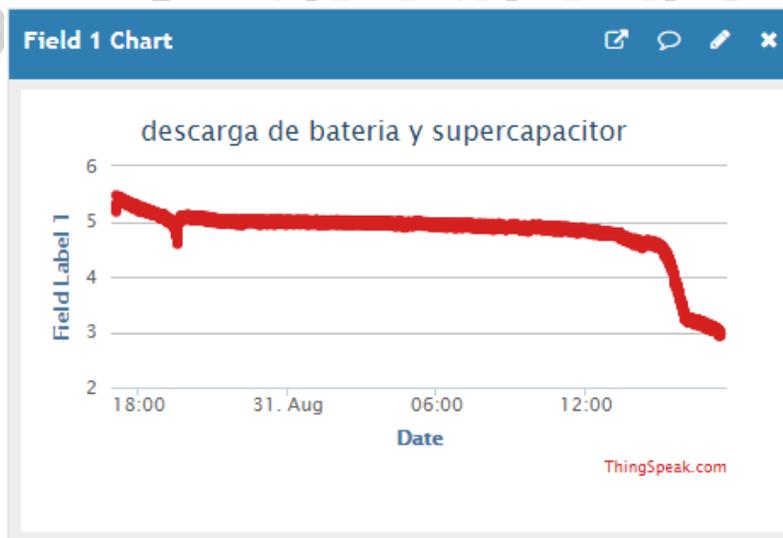


Figura 48 Descarga de baterías Ni-MH en sistema de conmutación con supercapacitores

Como podemos observar no se logró el objetivo de prolongar por más tiempo el sistema de conmutación de baterías y supercapacitores en comparación con el sistema de solo baterías.

No se lograron realizar más pruebas por inconvenientes en los supercapacitores que presentaron un daño al momento de realizar una conexión indebida por accidente, y la compra de otros supercapacitores es un proceso demorado ya que no son muy asequibles comercialmente en la ciudad de Bogotá.



Los Libertadores
Fundación Universitaria



Los Libertadores
Fundación Universitaria