



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Redes de sensores WiFi de bajo consumo.

Autor

Carlos Andrés Trasviña Moreno

Director

Roberto Casas Nebra

Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013

Redes de sensores WiFi de bajo consumo.

Resumen

Las redes de sensores inalámbricas o WSN, por sus siglas en inglés, demandan metodologías de diseño de baja potencia que puedan manejar efectivamente la cantidad de energía provista para prologar la longevidad de los sistemas tanto como sea posible. Nodos alimentados por baterías son poco adecuadas en algunos casos, puesto que el mantenimiento, reemplazo y otros factores podrían hacerlo inviable, lo cual presenta la oportunidad del uso de *energy harvesting* como una opción factible.

Las comunicaciones se presentan como un área de diseño crucial en las WSN, ya que estas se presentan como el bloque más demandante energéticamente. Es común encontrar diseños que adoptan estándares basados en el 802.15.4, como lo es ZigBee, los cuales fueron desarrollados con el afán de satisfacer la demanda de dispositivos electrónicos de bajo consumo. Debido a esto, es difícil pensar que un protocolo como WiFi, que tiene una demanda alta de energía, pueda ser una implementación viable para un sistema de este tipo. Sin embargo, con los últimos progresos en los estándares de este protocolo, así como estrategias y dispositivos de bajo consumo, es posible lograr diseños que permiten utilizar la ya tan conocida y propagada red de WiFi para WSN.

En el presente trabajo se realizará un análisis a fondo sobre las particularidades de WiFi, enfocándose en el consumo energético y los escenarios en los que presenta beneficios a las WSN. Para esto se concretará un modelo de nodo sensor, donde se definirán los procesos necesarios para un sensado y transmisión de datos, tomando en cuenta los tiempos requeridos para dichas actividades. Posteriormente se describirá el hardware utilizado para la validación, medición y comparación de los protocolos WiFi y ZigBee, éste último siendo punto de referencia/comparación para redes de sensores inalámbricos. Ambos protocolos serán estudiados para conocer sus límites de implementación y en el caso de WiFi, como optimizarlo para prolongar su longevidad. Adicionalmente se realizará una simulación de un circuito de *energy harvesting* termoeléctrico el cual alimentará el nodo sensor con el afán de definir la viabilidad de este tipo de fuentes de alimentación en WSN, específicamente con comunicaciones WiFi.

Índice

Agradecimientos	2
Glosario de términos.....	3
1. Introducción	4
2. Objetivos.....	5
2.1 Organización de la memoria.....	6
3 Antecedentes	6
3.1 Definición de un Sensor.....	6
3.2 Energy Harvesting.....	7
3.3 Comunicaciones WiFi	12
4 Caracterización del nodo WiFi.....	13
4.1 Máquina de Estados Finita	13
4.2 Análisis teórico de consumo energético.....	14
4.3 Descripción del hardware.....	17
4.4 Pruebas y análisis de variables	18
4.4.1 Caracterización de la carga	19
4.4.2 Escenarios de transmisión.....	21
4.5 Comparación de WiFi vs ZigBee.....	23
4.5.1 Descripción del módulo ZigBee.....	23
4.5.2 Mediciones	24
5 Caracterización del módulo de energy harvesting	27
5.1 Modelado del transductor.....	30
5.2 Cálculos para el acondicionamiento de energía.....	31
6 Conclusiones.....	34
7 Bibliografía.....	34
8 Anexo 1.....	37
9 Anexo 2.....	42
10 Anexo 3.....	45
11 Anexo 4.....	48
12 Anexo 5.....	51
13 Anexo 6.....	54
14 Anexo 7.....	57

Agradecimientos

Primero que nada, quisiera agradecer a mi esposa por su apoyo incondicional, paciencia y su manera de siempre poder mejorar mi estado de ánimo, sin ella la conclusión de esta etapa y el principio de la siguiente sería imposible. A mi director Roberto y todo el grupo de HOWLab, en particular a Ángel y Rubén, les agradezco haberme brindado su sabiduría en momentos difíciles, confianza y excelente compañerismo. De la misma manera a mis padres y hermanos quienes siempre daban las palabras de aliento necesarias y nunca dejaron de creer en mí. También agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo Sudcaliforniano de Ciencia y Tecnología (COSCYT) por el apoyo económico que me brindaron.

Glosario de términos

- AC.- Corriente alterna (*Alternate current*).
- ACK.- Acuse de recibido (*Acknowledgment*).
- AD.- Analógico-digital (*Analog-digital*).
- AP.- Punto de acceso (*Access point*).
- DC.- Corriente directa (*Direct current*).
- FSM.- Máquina de estados finitos (*Finite state machine*).
- H2M.- Humano-máquina (*Human to machine*).
- IC.- Circuito integrado (*Integrated circuit*).
- IP.- Protocolo de internet (*Internet protocol*).
- LAN.- Red de área local (*Local area network*).
- LDO.- Regulador de baja caída de tensión (*Low-dropout regulator*).
- M2M.- Máquina-máquina (*Machine to machine*).
- MIC.- Código de integridad de mensaje (*Message integrity code*).
- MIMO.- Múltiples entrando – múltiples saliendo (*Multiple in-multiple out*).
- MR.- Modulo de radio.
- OFDM.- Multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal frequency division multiplexing*).
- PS.- Ahorro energético (*Power save*).
- PSK.- Llave pre-compartida (*Pre-shared key*).
- RF.- Radio frecuencia.
- RTCC.- Contador de reloj en tiempo real (*Real time clock counter*).
- Rx.- Recepción.
- SoB.- Sistema en placa (*System on Board*).
- TCP.- Protocolo de control de transmisión (*Transmission control protocol*).
- TEG.- Generador termoeléctrico (*Thermoelectric generator*).
- TKIP.- Protocolo de integridad temporal de llave (*Temporal key integrity protocol*).
- Tx.- Transmisión.
- UDP.- Protocolo de datagramas de usuario (*User datagram protocol*).
- WEP.- Privacidad equivalente a cableado (*Wired equivalent privacy*).
- WPA.- Acceso WiFi protegido (*WiFi protected access*).
- WSN.- Redes de sensores inalámbricos (*Wireless sensor networks*).

1. Introducción

Las redes de sensores inalámbricas, o WSN, proveen información vital del entorno para ayudar a mejorar el estilo de vida de usuarios, sin la necesidad de interacción humana o reduciéndola a lo más mínimo [1][2]. Es común encontrar estos sistemas siendo utilizados para monitorizar variables de condiciones ambientales [3], de estados médicos[4][5] o de salud estructural[6], entre otros. Usualmente tienden a depender de una fuente de energía como pueden ser baterías primarias o baterías secundarias (recargables), que tienen un ciclo de vida finito relativamente corto, teniendo que ser reemplazadas/recargadas. En algunos casos esto presenta un inconveniente mayor, ya que los nodos de una red pueden estar desplegados en zonas de difícil acceso[7] o áreas de ambientes extremos[9], haciendo que la sustitución de la fuente de energía sea algo poco viable. Una alternativa a estas fuentes de energía, es el uso de energías de origen ambiental provenientes del sol, vibraciones, radiaciones térmicas o señales de radio frecuencia mediante transductores[10]. Sin embargo, éstas tienden a proveer energía de manera intermitente y con una potencia relativamente baja [11]. Debido a esto, es necesario contar con metodologías y estrategias de diseño de bajo consumo para mejorar la administración de energía a través de los dispositivos, con el objeto de incrementar la vida útil al máximo [12], tanto en el caso de que ésta provenga de una fuente electroquímica o ambiental.

En un nodo de WSN se pueden identificar cuatro bloques básicos con los cuales se pueden describir cualquier elemento de este tipo de manera general: fuente de alimentación, gestión de energía, captación y procesamiento de datos y radio comunicaciones (Figura 1).

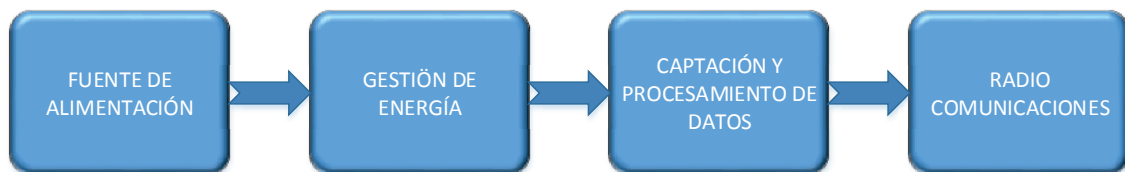


Figura 1 – Bloques fundamentales de un nodo WSN

Dentro de estos bloques, las comunicaciones inalámbricas representan uno de los sectores de mayor consumo energético que puede presentar un dispositivo. Es común el uso de protocolos como Zigbee, Bluetooth[13], 6LowPan u otros de tipo propietarios en las WSN [14], teniendo cada uno sus ventajas en distintos escenarios. Estos se presentan como soluciones altamente eficientes para nodos autónomos, puesto que su consumo energético se encuentra dentro de los más bajos. Sin embargo los protocolos basados en el 802.15 presentan un problema en despliegues sobre áreas metropolitanas, esto es que exhiben poca o ninguna infraestructura. Por otro lado protocolos basados en el 802.11, como lo es WiFi, tienen una red ampliamente desplegada en este tipo de zonas (Figura 2) y, actualmente, se encuentra utilizada en una gran cantidad de dispositivos. No obstante, no es común que estos protocolos sean usados en aplicaciones de sensores autónomos.

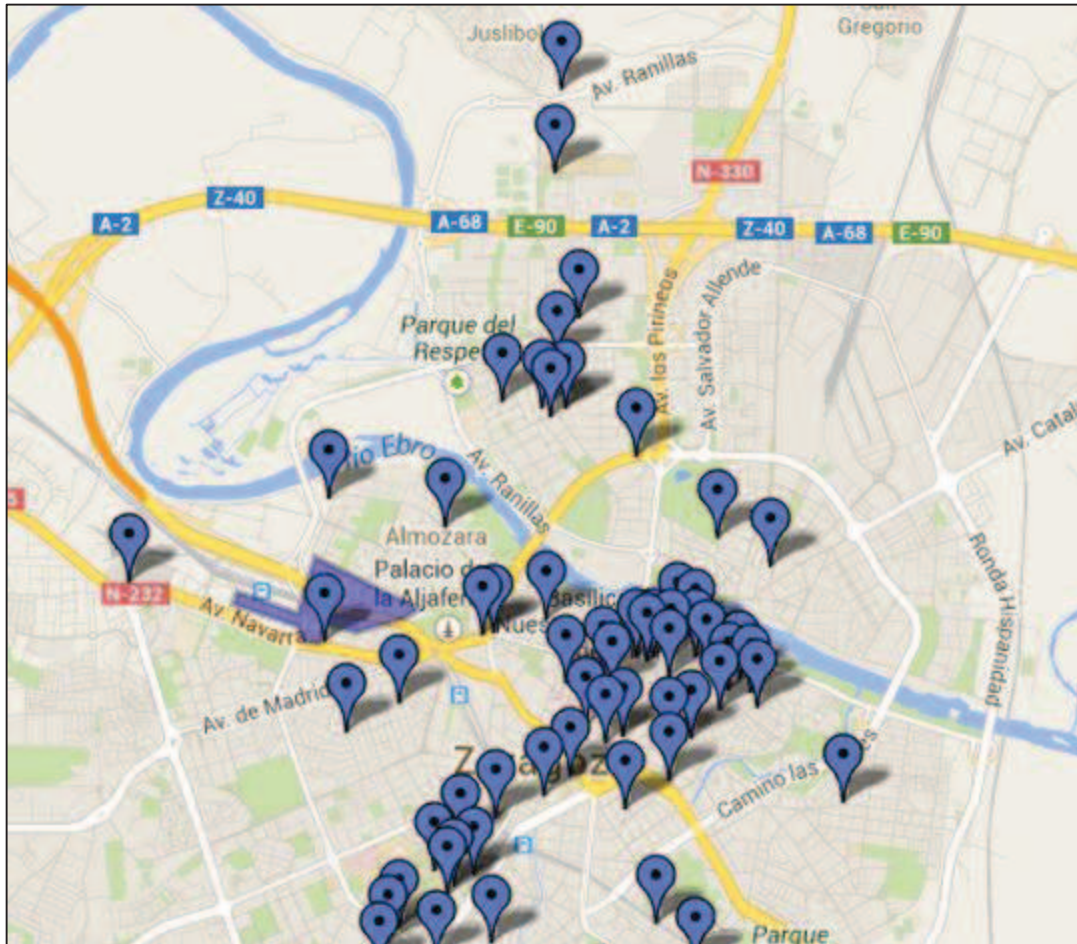


Figura 2 – Redes WiFi gratuitas en Zaragoza[15]

La idea de que WiFi es un protocolo de alto consumo energético y que usualmente se utiliza para aplicaciones que requieren una tasa de transmisión de datos alta, son algunas de las razones por las que se piensa que no es viable una implementación de WSN con este tipo de comunicaciones [16]. Aunque esto es parcialmente cierto, actualmente presenta capacidades que podrían ser aplicadas a actividades de sensado. Las recientes mejoras de estos protocolos, fusionados con estrategias de ahorro energético y dispositivos electrónicos de bajo consumo pueden habilitar WSN con WiFi en ambientes de ciudades inteligentes [17].

2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es comprobar la viabilidad ventajas e inconvenientes de un nodo para redes de sensores inalámbricas utilizando WiFi como protocolo de comunicaciones en áreas metropolitanas, domicilios, entornos de trabajo tipo oficina/laboratorio o despliegues en la industria, puesto que son zonas donde habitualmente se utiliza el protocolo que mencionado. La validación de esto podrá agregar otro tipo de posibilidades a los comúnmente implementados. Para ello se estudiará y caracterizará electrónicamente un sensor WiFi, medirá el consumo y comparará con un nodo sensor ZigBee.

Adicionalmente se realizará un estudio entre el uso de una fuente de energía estática y otra de origen ambiental, para identificar el rango de escenarios donde resulten benéficos para la implementación deseada. En este sentido se analiza un elemento Seebeck, y propone un circuito

de acondicionamiento que permita la alimentación del citado nodo WiFi. Además se diseña una etapa intermedia que conmutará la carga cuando exista suficiente energía para iniciar operación, reduciendo consumos indeseados.

Como nota adicional, se informa que parte de este trabajo ha sido enviado al *11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices* y al momento se encuentra en proceso de revisión (Anexo 1).

2.1 Organización de la memoria

El presente documento se organiza en un capítulo de antecedentes, donde se le proporciona al lector información necesaria para el entendimiento del desarrollo expuesto en el trabajo. Posteriormente se estudia las actividades realizadas en una transmisión WiFi como validación teórica, de cara a definir un *hardware* para integración en una red de sensores. Dentro del mismo capítulo, se lleva al lector a una comparación entre WiFi, con TCP/UDP, y ZigBee, descubriendo las problemáticas y beneficios de cada uno. Para finalizar, se analiza la posibilidad del uso de una fuente de *energy harvesting* para alimentar al nodo sensor. Eso se lleva a cabo modelando el comportamiento de un elemento Seebeck y simulando una etapa de acondicionamiento de energía para la carga WiFi.

3 Antecedentes

3.1 Definición de un Sensor

Una red de sensores puede tener una gran cantidad de nodos, los cuales pueden actuar de diversas maneras. De acuerdo con la relación con su entorno, se pueden clasificar como sensores, actuadores, interfaces, *gateway* y enrutador. Algunos de estos pueden presentar una o más de estas características (Figura 3).

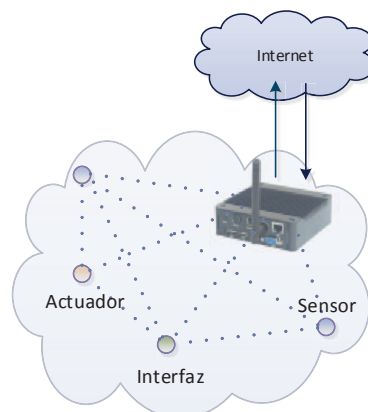


Figura 3 – Nodos en una red de sensores

Una gran cantidad de sistemas WSN se enfocan primordialmente en aplicaciones de medición de variables en un entorno. Esto significa que un dispositivo extraerá la información requerida y la envíe a un sistema de mayor jerarquía, sin interactuar con otros nodos de la misma red. Tomando esto en cuenta, se pueden considerar ciertas estrategias de operación básicas:

- Sensado y transmisión temporizado.- Los nodos tomarán lectura de datos y los transmitirán a intervalos definidos. La cantidad de mediciones y envíos pueden variar, en algunos casos puede ser preferible agrupar una cantidad de medidas para su transmisión eventual en un solo paquete.
- Análisis de evento.- Las mediciones se realizan a través de interrupciones o a intervalos definidos y las transmisiones solo se efectúan cuando se ha cumplido una condición dada; por ejemplo en caso de detección emanaciones de calor excesivas.
- Disponibilidad en tiempo real.- El nodo permanecerá siempre en modo “escucha”, esperando instrucciones del sistema para medir y transmitir cuando se le requiera.

Las primeras dos estrategias pueden satisfacer la mayor parte de las aplicaciones que requieran capacidades de sensado. En estos casos es posible mantener al módulo de comunicaciones en un estado de dormido la mayor parte del tiempo, donde deberá consumir una cantidad mínima de energía puesto que la información solo se enviará cuando ciertas condiciones se hayan cumplido. En un caso de disponibilidad en tiempo real, no es posible mantener el nodo en condiciones de consumo mínimo o apagado, ya que el sensor inalámbrico podría ser requerido en cualquier momento para la realización de una actividad.

Dicho esto, en una gran cantidad de casos, una WSN puede ser considerada como una serie de dispositivos sensores que reportan información a un sistema. Esta definición se adapta a un escenario de un sistema WiFi, asociado a un AP central en modo infraestructura, donde el módulo de comunicaciones permanece inactivo la mayor parte del tiempo [18].

3.2 Energy Harvesting

Energy harvesting se puede describir como el proceso de recolectar energía de diversas fuentes ambientales para ser empleado en un arreglo electrónico, como podría ser un dispositivo móvil o una red de sensores. Aunque esta definición podría englobar a sistemas a gran escala como turbinas eólicas o generadores hidroeléctricos, el término de *energy harvesting* es comúnmente acuñado en el empleo de fuentes de energía renovable a micro escala.

Existen diversas clasificaciones para los distintos tipos de energías (Figura 4) que se pueden extraer del entorno, en este trabajo se ha optado por una división similar a la propuesta por Penella y Gasulla [19] la cual abarca un espectro amplio de fuentes.



Figura 4 – Fuentes de energy harvesting[20]

- Energía radiante
 - Espectros electromagnéticos
 - Solar
 - Campos eléctricos y magnéticos
 - Radiofrecuencias
 - Radiactiva
- Energía mecánica
 - Vibraciones
 - Electroestática
 - Presiones acústicas y atmosféricas
 - Actividad humana
 - Cinética
- Energía térmica
 - Termoeléctrica
 - Piroeléctrica
- Energía bioquímica
 - Electrólisis
 - Bioelectromagnetismo

Un módulo de *energy harvesting* puede variar considerablemente dependiendo de factores como el tipo de fuente que se utilizará o la arquitectura de la carga. Sin embargo es posible definir un modelo básico que puede ser dividido en cinco bloques primarios: transductor, acondicionamiento energético, almacenaje de energía, acondicionamiento de salidas y la carga (Figura 5).

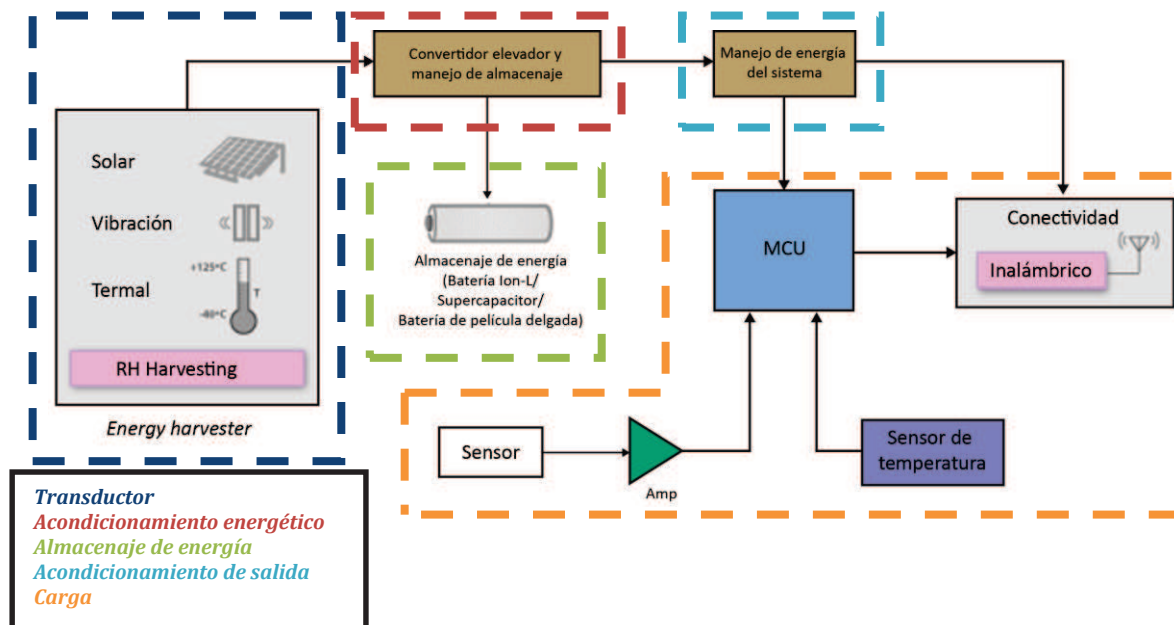


Figura 5 – Modelo de un *energy harvester* [21]

- Transductor.- Convierte energía ambiental en electricidad, entendiéndose por esto la transformación de energías de tipo solar, térmica, bioquímica, entre otras.
- Acondicionamiento energético.- Esta etapa se utiliza para cargar una unidad de almacenaje. Este bloque varía acorde al origen de la fuente, dado que esta puede proveer corriente AC o DC. Diversas técnicas deben ser usadas para maximizar la extracción de poder de la fuente para poder llegar a su máximo de eficiencia, el cual es cambiante según el tipo de energía.
- Almacenaje de energía.- Este bloque provee un flujo de energía constante a la carga desde la fuente de energía variable e incrementa el tiempo de operación del sistema.
- Acondicionamiento de salida.- Provee la potencia necesaria para la carga. Usualmente esta sección está regida por un convertidor DC/DC para que el modulo envíe el voltaje correcto para una o varias salidas.
- Carga.- Esta sección consiste de diversas partes que pueden ser utilizadas en conjunto o por separado, dependiendo de las necesidades del diseñador.
 - Sensores
 - Actuadores
 - Procesadores
 - Transceptores de RF

Cada una de estas etapas debe ser analizada para el diseño de un sistema con estas particularidades, y que variará dependiendo de la fuente de energía, la tecnología y las salidas deseadas, entre otras cosas.

Tomando en cuenta estrategias de operación como las propuestas en el punto anterior, donde en su mayor parte el nodo se encuentra en un estado de dormido, se puede decir que la carga tendrá un comportamiento de tipo pulsado. Adicionalmente para que un modelo de *harvesting* como el anterior pueda cumplir el propósito de energizar una carga pulsada de manera continua, es necesario que la cantidad de energía generada por el transductor sea mayor a la energía

consumida[19]. Además, es importante también incluir dentro de este cálculo las mermas que puede tener el sistema; como por ejemplo las pérdidas de conversión entre bloques y la auto-descarga del reservorio de energía (Figura 6). Por lo tanto, a manera generalizada, dicho modelo de *harvesting* se puede definir de la siguiente manera:

$$P_{generada} \geq P_{consumida} + P_{pérdidas}$$

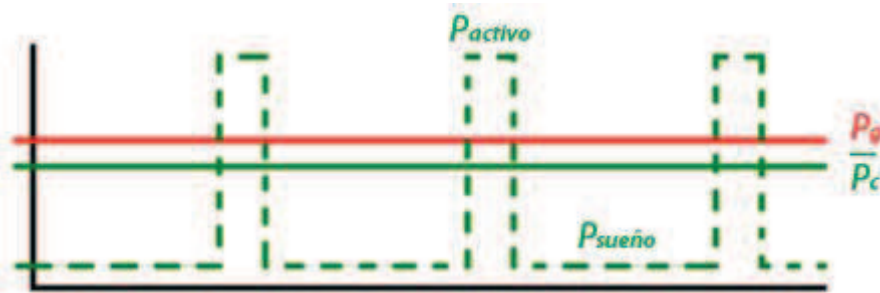


Figura 6 – Comportamiento del consumo energético de una carga pulsada

Dado esto, es necesario una unidad de almacenamiento que pueda tolerar este comportamiento. Para lograrlo es indispensable entender las necesidades del sistema que se propone a diseñar y buscar cumplir con características como baja auto-descarga, ciclo de vida alto, densidad energética alta y baja impedancia interna. Algunas implementaciones comunes para estos casos son baterías recargables, baterías de película delgada y supercondensadores, cada uno con sus ventajas y desventajas (Tabla 1).

Tabla 1 – Comparación de reservorios de energía[22]

Tipo de almacenaje	Densidad de potencia	Densidad de energía		Temperaturas extremas		Auto-descarga mensual	Ciclos de vida
		Wh/L	Wh/Kg	Almacenado	Operación		
Ácido	Alto	70	35	-60°F/130°F	-40°F/130°F	20-30%	200
Níquel cadmio sellado	Moderado a alto	80-105	30-35	-65°F/113°F	-40°F/113°F	15-20%	300
Hidruro de níquel metal	Moderado a alto	175	50	113°F (máx.)	-4°F/122°F	20%	300
Ion litio	Moderado	200	90	130°F (máx.)	-4°F/130°F	5-10%	500
Película fina	Moderado a bajo	1000	400	300°F (máx.)	-40°F/300°F	Insignificante	10000+
Supercondensador	Bajo	5	3	158°F (máx.)	-40°F/158°F	100%	100000+

De la lista de reservorios mencionados, los de uso más común actualmente son los supercondensadores. Este tipo de almacenamientos pueden tolerar el comportamiento de descarga a pulsos que es característico de los nodos de WSN, además de poder almacenar una mayor capacitancia que los condensadores convencionales en un empaquetado pequeño. Otras ventajas son que tiene un ciclo de vida de varios años, como se puede apreciar en la tabla 1, y que cuenta con una impedancia interna muy pequeña con lo cual se disminuyen las pérdidas de voltaje mientras se entregan picos de corriente altos. Sin embargo esta última característica también es una de las principales dificultades a la hora de diseñar. Al tener una impedancia interna baja y realizar la primera carga cuando el condensador se encuentra vacío, este asemeja una resistencia muy pequeña, con lo cual se le es aplicada una corriente alta de influjo inicial que requiere ser limitada para evitar problemas con la fuente de alimentación[23]. Probablemente la mayor desventaja que presentan es su alto nivel de auto-descarga, ya que en cuestión de 24 horas un supercondensador puede perder cerca de la mitad de su carga almacenada (Figura 7).

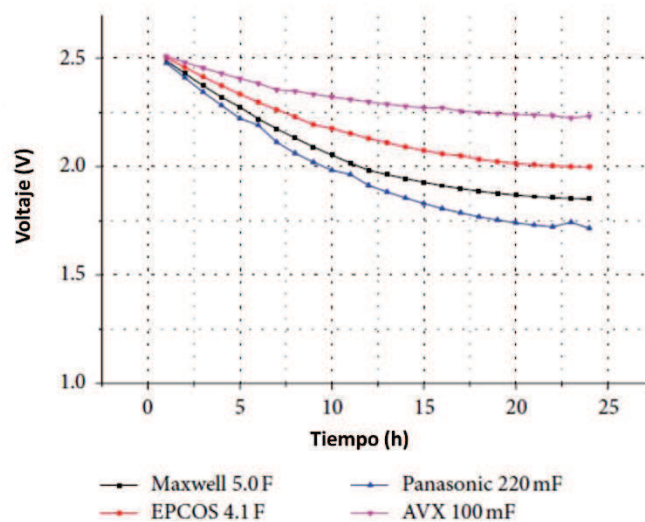


Figura 7 – Auto-descarga de varios supercondensadores [24]

Por esto algunos autores presentan como posibilidad alterna un modelo híbrido, donde se busca tener los beneficios de las altas densidades de las baterías recargables y la baja impedancia de los supercondensadores (Figura 8). Esto se traduce a una caída de voltaje menor y una prolongación de la vida útil, aunque en periodos de ejecución largos las altas temperaturas se pueden presentar como un factor adverso, requiriendo un disipador de calor o un módulo de enfriamiento adicional[25].

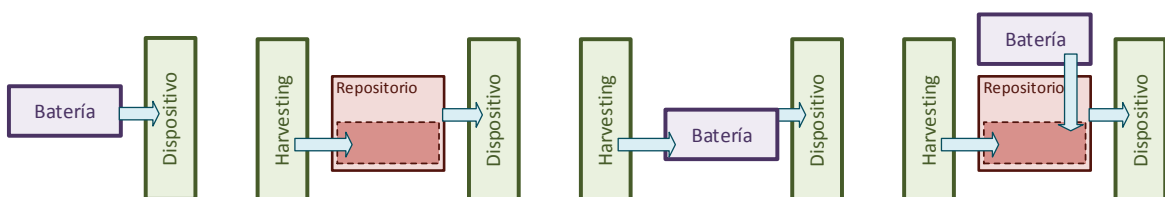


Figura 8 – Modelos de reservorios propuestos

3.3 Comunicaciones WiFi

La idea general de WiFi es que no es apto para aplicaciones de sensado autónomas, debido a su orientación hacia transmisión de datos con tasas de transferencia muy altas en ambientes de interacción H2M donde lo importante es la velocidad y no el consumo energético. Los primeros transceptores WiFi funcionaban con el protocolo 802.11b, los cuales operaban en la banda de 2.4 GHz con una tasa de transmisión de teórica de 11Mbps. Posteriormente el 802.11a arribaría, con ratios de datos cinco veces más rápidos y utilizando OFDM, efectivo en los 5 GHz. Aunque 802.11a parecía ser la solución para la demanda de alta transferencia continua, su falta de compatibilidad con 802.11 debido a la banda de operación, requirió un nuevo avance. El protocolo 802.11g presentó compatibilidad con 802.11 y 802.11b, utilizando OFDM en la banda de 2.4 GHz, lo cual permitió entregar los mismos 54Mbps que 802.11a.

Con la implementación de conceptos como el *internet of things* llegaron nuevas necesidades que cumplir [26], donde se desviaría de escenarios H2M a esquemas de interacción más M2M [14] y el manejo de la energía disponible jugaría un rol mucho más importante. Dado que este no era el enfoque primario de WiFi, nuevos transceptores se desarrollaron con modalidades de hibernación y dormir, así como tiempos de transición rápidos entre estados activos e inactivos [27], permitiendo su operación por periodos de tiempo más largos con un presupuesto de energía estricto. Estándares basados en el IEEE 802.11, como el 802.11g, también pueden invocar una modalidad de PS donde el AP almacena la información destinada al nodo hasta que este salga de modo dormir. Adicionalmente, protocolos más recientes, como el 802.11n, presentan capacidades de banda dual a 2.4 GHz o 5 GHz con anchos de banda de canal de 20 MHz y 40 MHz con prestaciones de tipo MIMO [28]. Esto permite un arreglo de hasta cuatro antenas que habilita un multiplexado de canales espaciales o la formación de un haz, para el incremento de la tasa de transferencia y un rango más amplio de la red. Estas características presentan el beneficio de poder transmitir a una mayor velocidad paquetes de alto volumen, pensando en dimensiones de información sensible, reduciendo el tiempo de transmisión de un nodo [29].

Debido que en las comunicaciones el tema de seguridad de datos es de alta importancia, al igual que en otros protocolos basados en el 802.11, en el estándar 802.11 se encuentran contemplados tres tipos de método de cifrado de datos para redes WiFi: WEP, WPA y WPA2. WEP fue el primer tipo de encriptación de datos que fue introducida en el estándar 802.11 y se encuentra definido en el 802.11i como un algoritmo de confidencialidad criptográfica opcional que puede ser usada para proveer la confidencialidad de datos que es subjetivamente equivalente al medio de una red LAN alámbrica que no emplea técnicas de encriptación para mejorar la confidencialidad[30]. Dentro de este se encuentran definidos WEP 64 y WEP 128, los cuales utilizan 24 bits para el vector de inicialización y los 40 o 104 bits restantes para la contraseña secreta[31]. Estos métodos han pasado a ser categorizadas poco confiables debido a que presentan muchas vulnerabilidades, una de ellas siendo el mismo vector de inicialización. Lo anterior llevó al desarrollo de WPA que presenta una distribución dinámica de claves, mejoras en el vector de inicialización e incluye el protocolo TKIP con MIC, entre otras cosas. Este nuevo método es más robusto que WEP y soluciona muchos de los problemas iniciales con TKIP, pero la búsqueda de ofrecer mayor seguridad a los usuarios llevó a la siguiente progresión. En el año de 2004 se concluyó la estandarización del 802.11i, el cual define la seguridad en redes

inalámbricas LAN, y se realizó una implementación total de este en WPA2. Este presenta un algoritmo de cifrado tipo AES que es mucho más potente y complejo que TKIP que brinda un mayor nivel de confidencialidad, aunque también es posible utilizar el protocolo TKIP pero con un MIC mejorado al de WPA. Adicionalmente agrega mayor seguridad en el proceso de autenticación y de conexión [31] [32].

Otra característica que ofrece WiFi para las redes de sensores son distintos protocolos en la capa de transporte, cada uno con sus peculiaridades, aquí se citarán solo los susceptibles de ser utilizados en la aplicación de sensado: TCP y UDP.

UDP se presenta como un servicio sencillo de punto a punto con tan solo dos funciones: agregar una capa de direccionamiento adicional a la definida en IP y detectar la corrupción de datos en la transmisión. Visto desde el punto del emisor, no es necesario que el *socket* creado esté conectado para su uso; se podría decir que es analógico a una transmisión radio comercial, donde aunque no existan radio-escuchas siempre se está emitiendo una señal, lo cual significa que UDP no asegura el arribo de la información al destinatario[33].

TCP sería el otro medio de transporte contemplado en el 802.11, el cual se diferencia de UDP por tener un método de conexión de tipo *3 Way Handshake* o estrechar las manos a tres bandas. Este proceso se refiere al proceso de intercambiar tres tramas, donde se emiten mensajes de sincronización y acuse de recibido. En este mismo se define entre cliente/servidor el tamaño de los *buffers* de Tx y Rx [34]. Si la analogía de UDP es una transmisión de radio comercial, para TCP sería una llamada telefónica donde el emisor requiere que quien recibe la llamada descuelgue el teléfono y escuche los mensajes.

Existen trabajos previos que han analizado la posibilidad del uso de WiFi en redes de sensores, algunos de ellos son los propuestos por Folea y Ghercioiu[35] o Tozlu et al[36]. Folea y Ghercioiu proponen la implementación de sensores IP de ultra bajo consumo con baterías, utilizando el protocolo transporte UDP, haciendo mayor énfasis en el diseño del software. Tozlu et al. realizan un estudio donde se observan a fondo las distintas características que presenta WiFi para bajo consumo con distintos tipos de estrategias de operación, para un nodo enlazado a un AP central. En esta publicación también se describen los beneficios del uso de transceptores con tecnología 802.11b/g frente a otros con 802.11n, pues se argumenta que para redes de sensores puede no ser tan favorable el aumento de ratio de transmisión en comparativa al aumento de complejidad/costo de la circuitería. Ambas publicaciones validan el uso de WiFi para aplicaciones de sensado, aunque nunca consideran la posibilidad del uso de *energy harvesting* como fuente de alimentación y tampoco modelan el nodo acorde al estándar IEEE1451.

4 Caracterización del nodo WiFi

4.1 Máquina de Estados Finita

Con lo previamente mencionado, se buscará la representación de las actividades principales de un nodo desde una perspectiva general. Para esto, se utilizará la estrategia de operación de sensado y transmisión temporizado para definir la funcionalidad del dispositivo.

En el estándar IEEE1451[37] se define una interfaz inalámbrica para sensores, microprocesadores o sistemas de instrumentación, y se especifican los protocolos de radio para estas mismas interfaces. Dentro del mismo se define una máquina de estados finita para describir la funcionalidad de un nodo sensor, donde se definen tres estados básicos de operación. Este tipo de modelo no es específico a ninguna tecnología de comunicaciones, como se puede apreciar en el trabajo de Asensio et al. [38], así que es posible utilizar este concepto para la adecuación a un nodo sensor con WiFi (Figura 9).

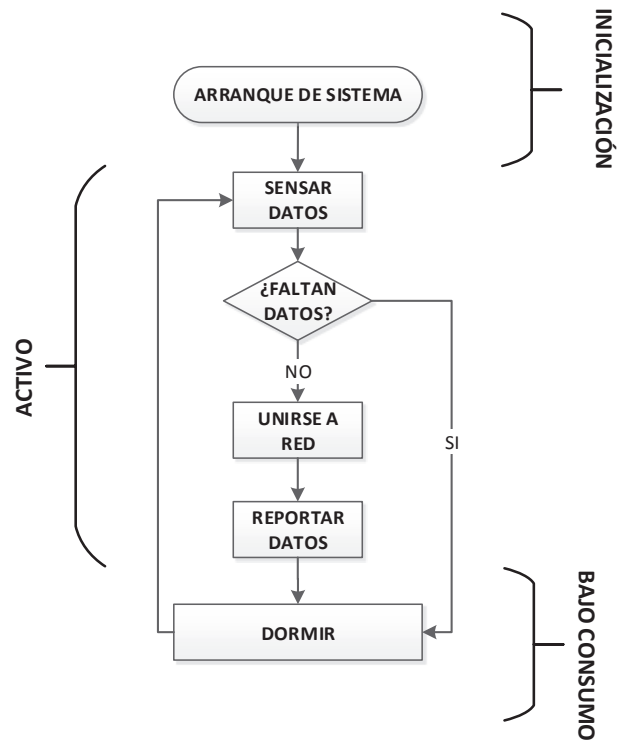


Figura 9 – Máquina de estados finitos WiFi

1. Estado inicial: Se inicializa el *hardware* relativo al microcontrolador (arranque de osciladores, periféricos, RTCC, etc.).
2. Estado activo: Se definen las actividades de sensado y transmisión en esta etapa. Mientras se estén tomando medidas, el nodo deberá tener habilitado el conversor AD para la adquisición de datos y una vez concluido esto se pasará a deshabilitar. En el caso de transferencia de mensajes, el módulo de radio WiFi deberá inicializarse para unirse a una red, reportar los datos y cerrar la conexión para reducir el consumo energético.
3. Estado de bajo consumo: El módulo de radio deberá estar apagado o en un estado de consumo mínimo, el microcontrolador se mantendrá en modo dormir y todos los periféricos se deshabilitarán para reducir la posibilidad de fugas.

4.2 Análisis teórico de consumo energético

Continuando con la propuesta de Asensio et al. [38], se hará un análisis teórico para cuantificar la cantidad de energía consumida en las distintas etapas de la máquina de estados. Para lo cual se definen estados de consumo, donde se identificarán los estados energéticos en los que se

encontrarán el microcontrolador y el módulo de radio, siendo estos las cargas principales del nodo (Tabla 2).

Tabla 2 – Estados de consumo para uC y MR

	Modo Energético 0 (ME ₀)	Modo Energético 1 (ME ₁)	Modo Energético 2 (ME ₂)	Modo Energético 3 (ME ₃)
uC	Durmiendo profundamente (oscilador de bajo consumo, RTCC activo)	Alta potencia (oscilador rápido)	Alta potencia (oscilador rápido)	Alta potencia (oscilador rápido)
MR	Durmiendo profundamente o apagado	Durmiendo profundamente o apagado	Rx on	Tx on

Estos estados de consumo pueden llegar a variar dependiendo de las prestaciones que pueda presentar el microcontrolador. Es posible que se cuente con características como un arranque de sistema a dos pasos, donde se emplea un oscilador de baja velocidad para las tareas sencillas y se utiliza el oscilador rápido cuando se requiere un mayor desempeño.

Ya definidos estos estados, se procede a la división de los tres estados de la FSM en sus cinco actividades primarias: inicialización, sensado de datos, unión a la red, reporte de datos y dormir; con sus respectivas sub-actividades. Para cada una de las sub-actividades se identifican los estados de consumo y se formulan ecuaciones, con las variables pertinentes, para tener una metodología generalizada adaptable a distintas configuraciones de hardware y poder calcular la carga utilizada en cada paso. Todos los datos utilizados en estos cálculos pueden ser extraídos de hojas de especificaciones y notas de aplicación (Tabla 3).

Tabla 3 – Ecuaciones de carga por cada sub-estado para un ciclo de operación

ACTIVIDADES	SUB-ACTIVIDADES	MODOS ENERGÉTICOS	ECUACIONES
Inicialización	Inicialización de variables	ME ₁	$I_{UC1} \times t_{INI} + Q_{UCINI}$
	Inicialización del RTCC	ME ₁	
	Arranque de la alarma del RTCC	ME ₁	
	Cambiar modo energético	ME _{1→0}	$Q_{UC1→0}$
Sensado de datos	Cambiar modo energético	ME _{0→1}	$Q_{UC0→1}$

	Activar sensor y puerto del periférico	ME ₁	$I_{UC_1} \times t_{SENSOR}$
	Adquirir datos	ME ₁	$(I_{UC_1} + I_{SENSOR}) \times t_{ADQ}$
Unirse a la red	Cambiar modo energético	ME _{1→2}	$I_{UC_1} \times t_{MR_{0→2}} + Q_{MR_{0→2}}$
	Conectarse a la red disponible	ME ₂	$(I_{UC_1} + I_{MR_2}) \times t_{CON}$
Reportar datos	Cambiar modo energético	ME _{2→3}	$I_{UC_1} \times t_{MR_{2→3}} + Q_{MR_{2→3}}$
	Transmitir datos	ME ₂	$(I_{UC_1} + I_{MR_3}) \times t_{TX}$
	Cambiar modo energético	ME _{3→2}	$I_{UC_1} \times t_{MR_{3→2}} + Q_{MR_{3→2}}$
	Recibir ACK (opcional)	ME ₂	$(I_{UC_1} + I_{MR_2}) \times t_{ACK}$
	Desconectarse del servidor y cerrar conexión	ME ₂	$(I_{UC_1} + I_{MR_2}) \times t_{CERRAR}$
Dormir	Cambiar modo energético	ME _{2→0}	$Q_{UC_{1→0}} + Q_{MR_{2→0}}$
	Dormir	ME ₀	$I_{UC_0} \times t_{DORMIR}$

Donde:

$I_{UC,MR_{0,1,2,3}}$: Corriente consumida por el uC y MR en los estados 0,1,2 y 3 respectivamente.

$Q_{UC,MR_{0,1,2,3→0,1,2,3}}$: Carga drenada por el uC y MR en las transiciones correspondientes a los modos energéticos.

$Q_{UC_{INI}}$: Carga drenada por el uC en la inicialización.

t_{SENSOR} : Tiempo que requiere el sensor para captar datos.

I_{SENSOR} : Corriente del sensor mientras se adquieren los datos.

t_{INI} : Tiempo que necesita el uC para la inicialización.

t_{ADQ} : Tiempo que necesita el uC para la adquisición de datos de las entidades de sensado, e.j. convertidor A/D.

t_{CON} : Tiempo que requiere el MP para conectarse al AP central.

t_{TX} : Tiempo que se requiere para transmitir los datos del MR al AP central.

t_{ACK} : Tiempo que se requiere para recibir el mensaje de acuse de recibido del MR por el AP central.

t_{CERRAR} : Tiempo que se requiere para cerrar las comunicaciones entre el MR y el AP central.

t_{DORMIR} : Tiempo en que el nodo está dormido.

En un ciclo normal de vida, la etapa de inicialización solo ocurrirá una vez o muy pocas veces, considerando el peor de los escenarios donde el nodo se reinicie de manera forzosa. Con esta conjetura es posible inferir que el paso de inicialización puede ser obviado, pues representa una

porción insignificante de la carga utilizada. Dado esto, el total de carga consumida por ciclo puede ser simplificada de la siguiente manera:

$$Q_{CICLO} = Q_{SENSADO} + Q_{UNION} + Q_{REPORTE} + Q_{DORMIR}$$

4.3 Descripción del hardware

Para el diseño y comprobación del modelo anterior, se seleccionaron los siguientes componentes y herramientas de análisis:

- Microcontrolador PIC24FJ256GA106 (Anexo 2).
- Transceptor WiFi 802.11b MRF24WB0MA (Anexo 3).
- Sensor de temperatura MCP9700A (Anexo 4).
- Real ICE monitor de energía (Anexo 5).
- Osciloscopio digital Picoscope 3206.

La carga se encuentra conformada por un microcontrolador y transceptor que fueron seleccionados debido a sus modos de operación de bajo consumo y relativamente rápidos tiempos de transición. El PIC24FJ256GA106 y MRF24WB0MA pueden operar desde una fuente de 2.7 V a 5.0 V, lo cual afectará directamente a la cantidad de corriente consumida y a las pérdidas por fugas. Para las pruebas que se realizaron, se usó como base la alimentación con un voltaje de 3.3V, el cual es común entre sistemas de este tipo. Aunque estos dispositivos no son los mejores en su clase, representan una media en dispositivos de bajo consumo y, consecuentemente, presentan un escenario no-óptimo para la base de este trabajo lo cual dará idea sobre las expectativas con dispositivos de mejores características. Ambos se encuentran integrados a manera de SoB en una misma placa llamada Flyport (Anexo 6), de OpenPicus, que fue seleccionada por sus características de plataforma abierta (Figura 11).



Figura 10 – Nodo WiFi.

El sensor de temperatura se seleccionó debido a su baja corriente de operación, la cual oscila en los 6uA. Opera con voltajes de 2.3V a 5.5V, tiene una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y se encuentra optimizado para convertidores ADC, lo que evita el uso de circuitos externos para el acondicionamiento de señal que pudieran consumir corriente adicional.

Para las mediciones de tiempo y corriente del nodo se emplea el monitor de energía Real ICE. Este módulo puede medir corrientes desde 1uA hasta 1A con una precisión de una muestra por

microsegundo. Sin embargo estas mediciones tienen que realizarse en dos etapas, una donde se miden corrientes de 1uA hasta 9mA y otra que utiliza el rango de 1mA a 1A, que no puede ser modificado en tiempo de ejecución de código. En los casos que se requiera mayor resolución, se hará uso del osciloscopio digital.

4.4 Pruebas y análisis de variables

Con el hardware anteriormente descrito y los datos técnicos recolectados de las hojas de especificaciones, se cuantifican la corriente consumida, así como los tiempos en cada fase y transiciones (Tabla 4). Estos resultados serán el primer indicio sobre la viabilidad de los componentes seleccionados como carga del sistema.

Tabla 4 – Corrientes y tiempos teóricos

	CONSUMO ENERGÉTICO	
	uC	MR
I_0	10 μ A	100nA
I_1	24 mA	100nA
I_2	---	89 mA
I_3	---	154 mA
I_{SENSOR}	6 μ A	---
$Q_{UC_{\text{INI}}}$	769.16 μ C	---
$Q_{0 \rightarrow 1}$	2.13 μ C	---
$Q_{0 \rightarrow 2}$	---	13.35 mC
$Q_{2 \rightarrow 3}$	---	1.21 μ C
$Q_{3 \rightarrow 2}$	---	1.21 μ C
$Q_{2 \rightarrow 0}$	---	8.9 μ C
$Q_{1 \rightarrow 0}$	2.13 μ C	---
t_{INI}	64.07 ms	---
$t_{0 \rightarrow 1}$	178 μ s	---
$t_{0 \rightarrow 2}$	---	300.2 ms
$t_{3 \rightarrow 2}$	---	10 μ s
$t_{2 \rightarrow 0}$	---	200 μ s
$t_{1 \rightarrow 0}$	178 μ s	---
t_{SENSOR}	225 ns	---
t_{ADQ}	975 ns	---
t_{CON}	---	1 s
t_{TX}	---	4 ms
t_{ACK}	---	128 μ s
t_{CERRAR}	---	10 ms

Estos valores recolectados son empleados en las fórmulas especificadas en la tabla 3 para deducir si el despliegue actual presenta condiciones adecuadas para su implementación. Dichos resultados se presentan en la tabla 5.

Tabla 5 – Carga teórica de las actividades primarias

ACTIVIDADES	Carga
Inicialización	2.32mC
Sensado de datos	2.15uC
Unirse a red	133.5mC
Reportar datos y dormir	1.85mC

Estos cálculos proveen un entendimiento de las actividades donde existe un consumo mayor y es deseable optimizar, si es que es posible. Con los resultados obtenidos, se puede evaluar a priori que el hardware seleccionado es adecuado para el sistema.

4.4.1 Caracterización de la carga

Con los análisis teóricos previos realizados al microcontrolador y transceptor de radio, se obtuvo una estimación de la conducta que tendrá el nodo, sin embargo existen variables externas que afectan estos cálculos y que no son cuantificables con esa metodología. La propia ejecución del *firmware* cargado en el nodo representa alguno de esos factores, los análisis de Tozlu et al. demuestran que el incremento en el peso del código cargado aumenta el tiempo de despertar que puede tener el nodo y, por ende, la energía consumida.

Debido a lo anterior se busca caracterizar el comportamiento real de la carga en distintos ambientes, logrando un claro entendimiento de que otros factores son claves en el diseño del módulo. Para esto se han realizados múltiples mediciones para el cálculo de la media estadística en cada los estados de dormir, transmitir y sensar. En estos últimos dos, se consideran los tiempos de despertar de los dispositivos, la conexión a la red en el caso de la transmisión y sus respectivos estados de transición. Las mediciones del estado de transmisión se aplicaron a envíos de datos utilizando los protocolos de transporte TCP y UDP.

Previo a la realización de estos ejercicios, el módulo de Flyport fue optimizado a nivel hardware y software. Se buscó eliminar los dispositivos del montaje que produjeran consumos adicionales y que resultaran innecesarios para el funcionamiento deseado, tales como diodos o reguladores de voltaje. A nivel de software se optimizaron o agregaron funciones para la capa de conexión a la red, transmisión/recepción de datos, sensado de valores y el estado de dormir. Además, se mejoraron los tiempos de transición entre actividades que presentaba el Flyport por defecto.

Al realizar las mediciones y extraer las medias de consumo de los estados, se logró obtener las siguientes corrientes de consumo:

- Dormir - 79 μ A. Esta corriente se presenta como mayor a la expuesta teóricamente, esto probablemente se deba a procesos que no se han optimizado a nivel hardware y software.
- Transmisión TCP – 67mA. En este estado se contempla el tiempo que le cuesta al micro despertarse, la inicialización del transceptor, la conexión a la red, la transmisión de datos, la recepción del ACK, la desconexión de la red y el tiempo para dormirse.

- Transmisión UDP – 72mA. En este estado se contempla el tiempo que le cuesta al micro despertarse, la inicialización del transceptor, la conexión a la red, la transmisión de datos, la desconexión de la red y el tiempo para dormirse.

Es importante notar la diferencia que se tiene entre lo medido y los cálculos teóricos, sobre todo en la corriente de dormir pues esta es casi ocho veces mayor del supuesto teórico. En el caso de las transmisiones TCP y UDP, la diferencia que hay entre la corriente media de estos dos, es debido a que el ciclo de transmisión de UDP es más tardado. Con estos valores y los tiempos medidos, se calcula la carga en la transmisión/sensado por protocolo. (Tabla 6).

Tabla 6 – Carga de sensado y transmisión de 1 byte.

Carga por protocolo		
Protocolo	Sensado	Transmisión
UDP	238uC	125mC
TCP	238uC	93mC

Obtenido esto se analiza la transmisión de distintos volúmenes de datos, pues se desea conocer la influencia que tiene en el estado activo (Tabla 7). Cabe mencionar que previo a la realización de estos experimentos, hubo un análisis previo de la red para tener conocimiento del canal más apropiado para vincular el nodo con el enrutador.

Tabla 7 – Tiempos de transmisión de datos

Tiempo de transmisión de datos (ms)						
Protocolo	1 byte	10 bytes	50 bytes	100 bytes	1000 bytes	10000 bytes
UDP	4.2	4.37	4.505	6.365	10.318	148.7
TCP	10.75	11.223	12.376	13.414	17.73	2230.5

Comparando las tablas 6 y 7 se puede ver que aun cuando el protocolo UDP transmite de manera más rápida, existe un factor que agrega mayor peso en su consumo en envíos pequeños. Para entender el porqué de esta conducta, se decidió hacer un análisis más a fondo entre ambos, haciendo un seguimiento de cada una de las actividades del ciclo por medio de señales auxiliares. Esto llevo a entender que la razón por la que UDP se comporta de esta manera en el diseño propuesto, se debe al tiempo que le toma al Flyport crear un socket UDP. Este proceso tarda aproximadamente 300ms, mientras que en TCP el socket se crea en 3-5ms.

Obtenidos los datos de transmisión, ambos protocolos se vuelven a comparar, pero ahora analizando el ciclo completo del estado activo cuando se efectúa una transmisión, esto con el afán de conocer el tiempo que le toma al módulo acceder al medio. En este ciclo se encuentran contemplados el tiempo de despertar del microcontrolador y transceptor, el tiempo de conexión al medio, la creación del *socket*, la transmisión de datos, la desconexión del *socket* y el tiempo necesario para regresar a modo dormir. Ambos protocolos serán probados en dos ambientes con enrutadores tipo “N” de distinto fabricante; en este caso en particular un Broadcom BCM63281 y Ralink RT2880F. Adicionalmente para cada uno se estudiará el impacto de distintas

opciones de encriptación de datos (WEP 64, WEP 128 y WPA2 PSK) y la ausencia de ello. (Figura 12).

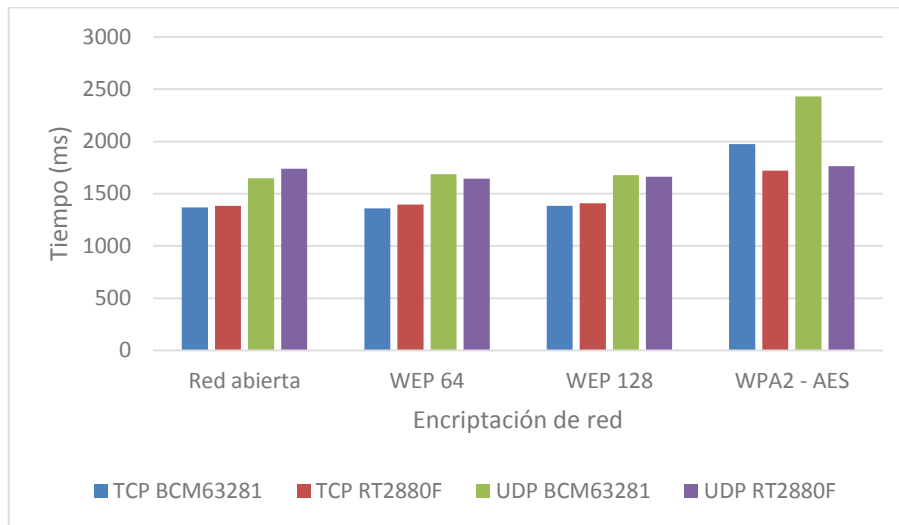


Figura 11 - Comparación de ciclos TCP y UDP

Los resultados mostrados en este apartado llevan a la conclusión de que los métodos de encriptación pueden afectar al consumo energético en una transmisión WiFi. Los tiempos relativos a una red con cifrado WEP 64, WEP 128 y o una red abierta son prácticamente los mismos. En cambio WPA2 PSK incrementa de manera notoria el tiempo de ciclo. Estos datos concuerdan con la teoría, WPA2 aumenta el tiempo de transmisión porque requiere un tiempo adicional para la negociación y tiene un método de cifrado de datos complejo. En cambio WEP 64/128 presentan una encriptación básica que, aunque es mejor que no tener comunicación abierta, es fácilmente quebrantable. La segunda conclusión es que sí existe una relación entre el desempeño del dispositivo WiFi y la tecnología del AP. En las pruebas de encriptación WEP y de red abierta, no parece haber diferencia alguna. No obstante los resultados con WPA2 son claros y muestran la importancia de la selección de este hardware, que no debe ser tomado a la ligera si se cuenta con una fuente de alimentación con energía muy limitada.

4.4.2 Escenarios de transmisión

En este apartado se evaluarán la influencia de las variaciones en el ciclo de trabajo del nodo para los protocolos UDP y TCP en una transmisión de 1 byte. Con esto se busca cuantificar la energía necesaria para cumplir los requerimientos que se podrían desear en despliegues reales y la dimensión del almacenamiento energético requerido. Debido a sus características y su uso recurrente en WSN, se hace la comparativa con condensadores y baterías de película delgada como almacenamiento de energía. Para calcular esto será necesario utilizar los consumos medios en los tiempos de sensado, transmisión y dormir. Los escenarios a valorados se representan en la tabla 8 y 9, junto el tamaño de los almacenamientos (expresados como capacidad de un condensador y de una batería) que se requerirán para poder realizar el ciclo propuesto en dichas tablas

Tabla 8 – Escenarios de transmisión y sensado de datos para un ciclo de operación de 1 hora

Escenario	Tiempo entre sensado	Tiempo entre transmisiones	Carga		Condensador		Película delgada	
			TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP
1	10s	1h	463mC	495mC	140mF	150mF	128μAh	137μAh
2	60s	1h	392mC	424mC	118mF	128mF	108μAh	117μAh
3	600s	1h	379mC	411mC	115mF	125mF	106μAh	114μAh
4	1h	1h	378mC	410mC	114mF	124mF	105μAh	113μAh

Tabla 9 - Escenarios de transmisión y sensado de datos para un ciclo de operación de 24 horas

Escenario	Tiempo entre sensado	Tiempo entre transmisiones	Carga		Condensador		Película delgada	
			TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP
A	600s	600s	20.2C	24.8C	6.13F	7.53F	5.61mAh	6.9mAh
B	10s	600s	22.2C	26.8C	6.74F	8.14F	6.17mAh	7.46mAh
C	600s	24h	6.96C	7C	2.11F	2.12F	1.93mAh	1.94mAh
D	60s	4h	7.74C	7.93C	2.34F	2.4F	2.15mAh	2.2mAh
E	600s	3h	7.61C	7.87C	2.3F	2.38F	2.11mAh	2.18mAh

Este análisis de la variación de ciclo de trabajo, en la valoración de distintos escenarios de sensado y transmisión, nos muestra de manera directa el almacenamiento requerido para el funcionamiento del nodo en un ciclo de operación dado. Adicionalmente aporta información sobre los pesos que tienen los estados de transmisión, sensado y dormir. En el ciclo de operación de 1 hora, se aprecia la baja contribución que tiene el sensado en el consumo general de todos los casos. En el caso del estado de transmisión, aun cuando este tiene el consumo más alto del nodo, solo en los escenarios A y B del ciclo de operación de 24 horas es posible notar un cambio significativo en el consumo. Esto significa que el estado de dormir consume la mayor parte de la energía en todos los escenarios expuestos. Esto es congruente, dado que más de un 90% del tiempo el nodo WiFi se encuentra en este estado.

Tomando en cuenta esto y los consumos de corriente medios obtenidos previamente, es posible deducir que la corriente del estado de dormir está influenciada en mayor parte por la corriente que gasta el microcontrolador en esta fase. La reducción de este corriente es un factor decisivo en el gasto energético del nodo, más allá de la encriptación y los protocolos de transporte utilizados.

El otro factor clave también puede ser inferido del mismo análisis mencionado en el párrafo anterior, este es ciclo de trabajo. La reducción del tiempo en que el nodo se encuentra en modo dormir, provocará que exista una mayor influencia por parte de los estados de mayor consumo de corriente, particularmente por el de transmisión. Es preferible optar por múltiples sensados y pocas transmisiones, aunque los paquetes de datos sean relativamente grandes, puesto que se puede aprovechar el ratio de transferencia alto que presenta WiFi.

La selección de un reservorio de energía es un elemento a considerar si el nodo operará por largos periodos de tiempo. Los supercondensadores tienen la problemática de su porcentaje de auto-descarga; en ciclos cortos como los de una hora, esta característica no es significativa, sin embargo en un periodo de 24 horas es posible perder un 20% de la energía almacenada. En situaciones de ejecución extendida las baterías de película delgada resultan mejor opción.

4.5 Comparación de WiFi vs ZigBee

Para poder definir los escenarios en los que es posible emplear WiFi y los beneficios reales que puede presentar en una red de sensores, es necesario conocer los protocolos que comúnmente son utilizados en este tipo de aplicaciones. Por esto se ha seleccionado un nodo con comunicaciones ZigBee para realizar la comparativa.

ZigBee es un protocolo basado en el estándar 802.15.4, al igual que Bluetooth y 6LowPan, que fue diseñado específicamente para aplicaciones de bajo coste y consumo energético, ya que su principal enfoque son las aplicaciones de sensado y/o control de dispositivos. Debido a esto la tasa de transmisión de datos es estrecha, alrededor de los 250Kb, ya que los volúmenes usualmente manejados en estas actividades son reducidos. El estándar presenta dos modos de operación únicos: activo (transmitir/recibir) y dormido. Además en este tipo de redes es posible implementar topologías de malla donde los nodos finales se comunican entre ellos o con el coordinador. En una red ZigBee pueden existir nodos de tipo coordinador, enrutador o dispositivo final[39].

4.5.1 Descripción del módulo ZigBee

En los análisis a seguir se empleará el módulo de radio ETRX357, el cual será controlado por un microcontrolador PIC18F26J11. Las características de consumo de corriente de ambos componentes serán tomados en cuenta para la estimación de la energía empleada en distintos escenarios, esta información será extraída de las hojas de especificaciones provistas por los fabricantes (Tabla 10).

Tabla 10 – Consumos del nodo ZigBee

Corriente por estado (mA)			
Estado	PIC18F26J11	ETRX357	Total

Dormido	0.0041	0.001	.0051
Rx	9.6	26.5	36.1
Tx	9.6	31	40.6

Para la medición de tiempos en modo activo, se analizarán distintas transmisiones con un osciloscopio Picoscope 3206 del cual se extraerán las mediciones para la realización de los cálculos. En cada uno de los mensajes se medirá el tiempo de transmisión de datos y el ciclo completo en modo activo, donde se incluye el tiempo de acceso al medio, los procesos de preparación para transmisión y el tiempo a modo dormir. El sensor ZigBee estará conectado a un coordinador de manera directa, para asemejar el comportamiento del arreglo WiFi propuesto (Figura 13).

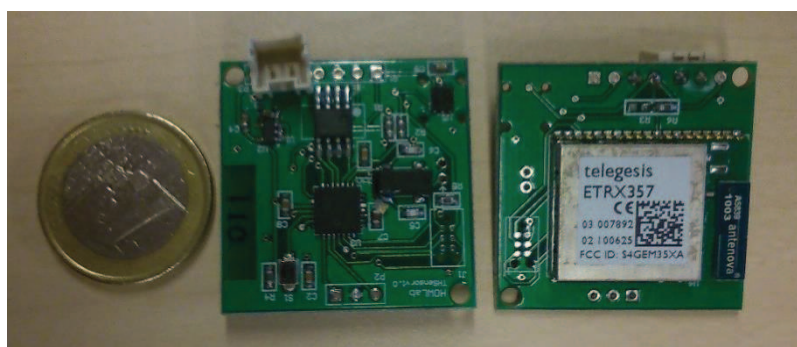


Figura 12 – Nodo ZigBee a dos caras.

4.5.2 Mediciones

En la figura 14 se puede apreciar la comparativa de los estados activos entre WiFi y ZigBee, donde es posible visualizar el peso que tienen estas actividades en cada uno. Cabe notar que cada uno tiene sus particularidades en estas etapas. El nodo ZigBee tendrá que responder al coordinador acorde al mensaje enviado previo al reporte de datos, desde la primera inicialización se conectará a la red del coordinador y en la etapa de dormir se emitirá periódicamente mensajes de *poll* para mantener la conexión. Por otro lado, el nodo WiFi mantendrá una alarma temporal sincronizada con el RTCC para saber cuándo despertar y en cada transmisión tendrá que unirse a la red.

El comportamiento visualizado en esta figura permite entender el aporte que tienen las actividades de pre-reporte y el reporte en sí. Para WiFi el reporte de datos es tan solo una fracción de este, mientras que el tiempo de conexión a la red representa un porcentaje alto de este. ZigBee, por otro lado, tiene un comportamiento contrario al antes descrito.

Al igual que en el apartado 4.4.1, se realiza una evaluación entre los tiempos de transmisión con distintos volúmenes de paquetes. En la tabla 11 se definen el número de bytes que se enviarán por paquete (b/p), variando la combinación de bytes por paquete, lo que llevará al entendimiento de la influencia que pueda tener esta segmentación.

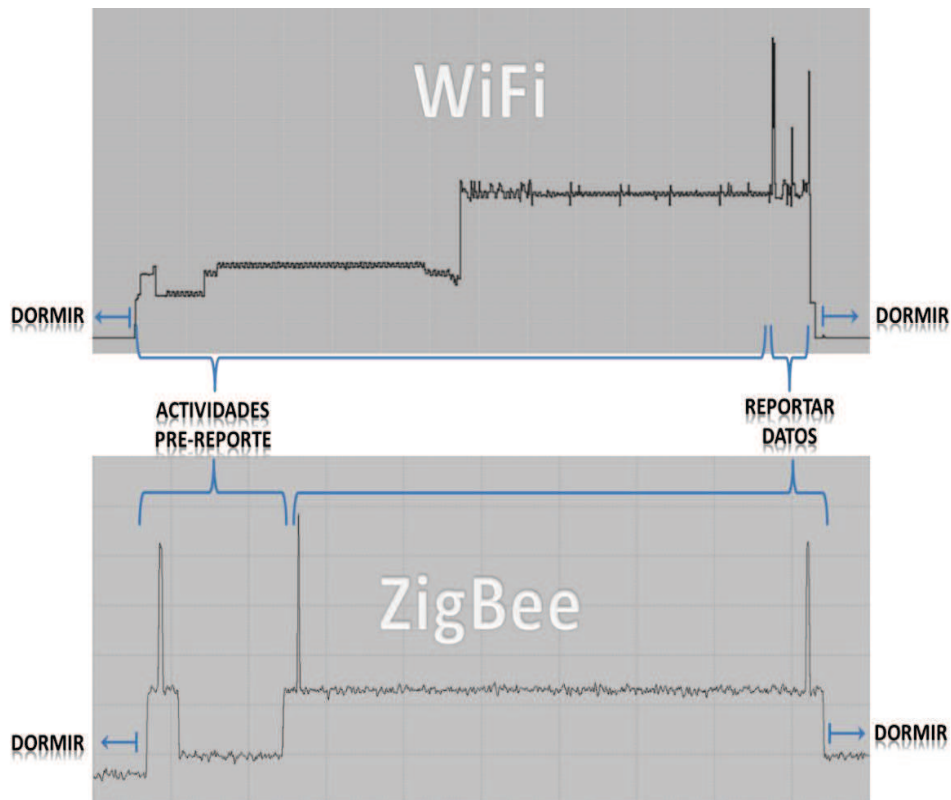


Figura 13 – Forma de onda de una transmisión WiFi-ZigBee

Tabla 11 – Comparación de tiempo de transmisión ZigBee-WiFi

Tiempo de Tx (ms)									
Protocolo	1 byte	10 bytes	50 bytes	100 bytes		1000 bytes			10000 bytes
	1b/1p	10b/1p	50b/1p	50b/2p	20b/5p	50b/20p	20b/50p	10b/100p	50b/200p
Zigbee	13.736	13.012	23.165	88.52	226.87	1236.6	2564.1	4843.4	12855
UDP	4.2	4.37	4.505	6.365		10.318			148.7
TCP	10.12	11.223	12.376	13.414		33.73			2230.5

Se seleccionó 50 bytes como el máximo posible por paquete para poder tener resultados más uniformes, aunque cabe notar que el máximo permitido con el módulo ZigBee es de 73 bytes.

Obtenido estos datos, se procede a la comparación de los ciclos completos de transmisión (Figura 14), como se hizo con anterioridad para WiFi, pero solo se seleccionarán los casos donde ZigBee se desarrolló de manera óptima.

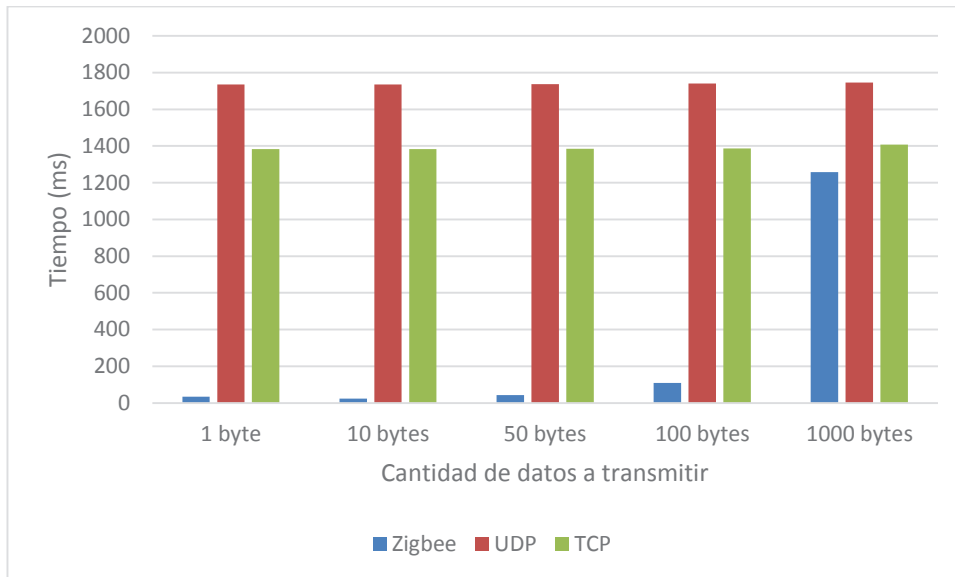


Figura 14 - Tiempos de ciclo ZigBee-WiFi

En esta figura no se muestran los resultados de la comparativa de 10,000 bytes debido a que, como se aprecia en la tabla 11, son demasiado grandes y se pierde perspectiva de los valores en los primeros casos. Sin embargo, de la tabla anterior se puede suponer el resultado.

Debido a que el tiempo no es el único factor que se debe contemplar, estos resultados no son del todo concluyentes. Para tener una idea más acertada, se calculará la energía utilizada en cada uno de los escenarios de transmisión. Con los datos provistos en los apartados anteriores y tomando en cuenta que tanto el nodo ZigBee como WiFi se contemplan con una alimentación de 3.3V, se cuantifica la energía necesaria para la transmisiones de distintos volúmenes de paquetes (Figura 15).

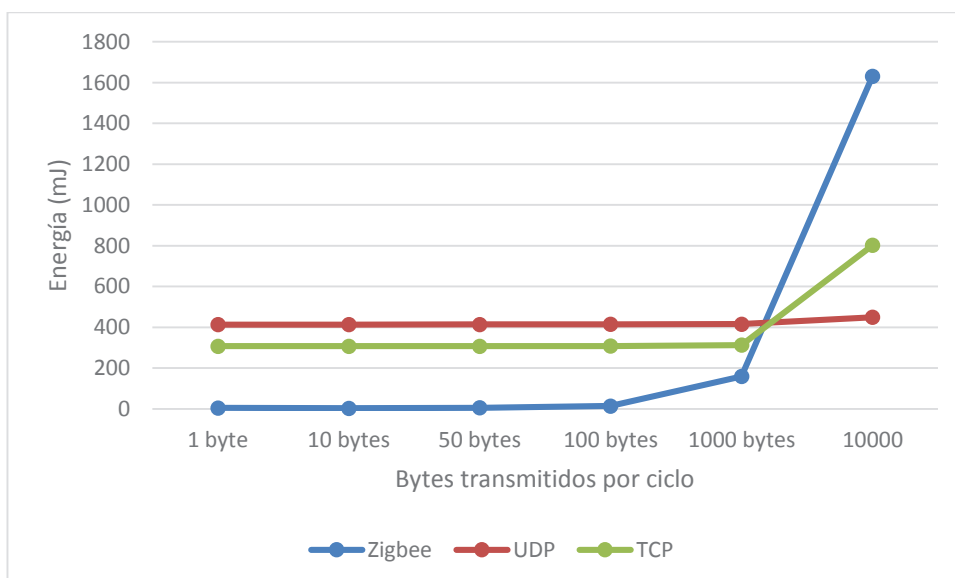


Figura 15 - Energía requerida en ciclos ZigBee- WiFi

En el presente capítulo se muestran escenarios de transmisión de distintos tamaños de paquetes. La segmentación de datos en ZigBee se presenta como un agente adverso, ya que el

tiempo aumenta de manera rápida conforme más paquetes necesiten ser enviados. TCP sufre el mismo problema en transmisiones mayores a 1500 bytes. La necesidad de ambos protocolos de esperar un mensaje de ACK para la transmisión del siguiente paquete es el causante principal de este comportamiento. Por otro lado UDP, al ser un protocolo más sencillo, puede emitir paquetes de 1500 bytes de manera casi consecutiva.

Los niveles de energía requeridos para la transmisión de datos, en conjunto con esta reciente declaración, permiten identificar los escenarios donde se desenvolverá mejor un protocolo u otro. Para el envío de pocos bytes ZigBee es más eficiente que los protocolos WiFi, aunque esto desacredita la posibilidad de uso de TCP o UDP en estos casos. Cuando la información se incrementa, debido a la agrupación de múltiples mediciones o un paquete grande, TCP resulta una buena opción por su balance entre consumo, tasa de transferencia y confiabilidad. Sin embargo en volúmenes de datos muy elevados, como podría ser la transmisión de una imagen, UDP supera a los otros protocolos.

5 Caracterización del módulo de energy harvesting

Para la validación de la hipótesis previa, se analizará un nodo sensor WiFi alimentado con un elemento TEG en los siguientes apartados. Este dispositivo estará conformado por cinco bloques funcionales (Figura 16), cada uno de ellos cuenta con una serie de dispositivos que han sido seleccionados por sus características particulares.

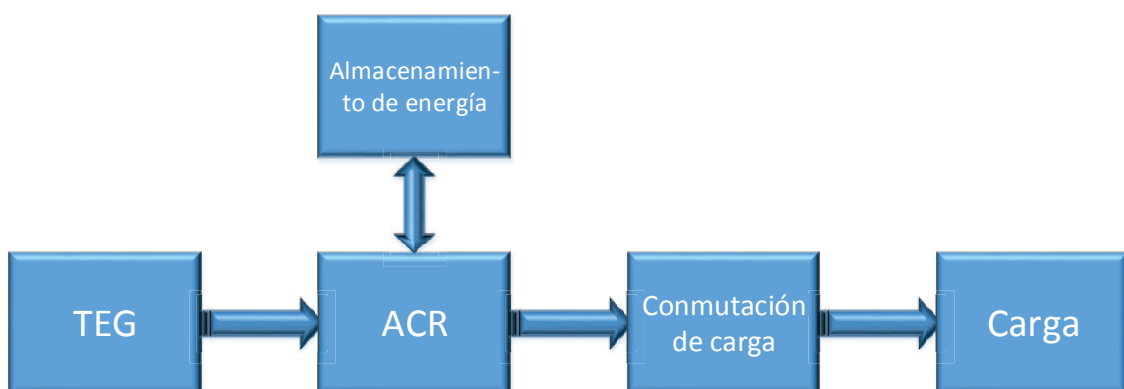


Figura 16 – Diagrama a bloques del nodo

Aunque de manera usual la etapa de acondicionamiento, carga y regulación de voltaje (ACR) se encuentran separados en bloques independientes, en el diseño propuesto se han podido fusionar en uno, debido a la utilización de un integrado que puede realizar estas tareas de manera simultánea, el cual será descrito con detalle en los siguientes párrafos.

Cabe notar la fase de conmutación de carga, la cual no se encuentra incluida en otros diseños anteriormente descritos. La razón de implementación de este bloque es la búsqueda del incremento en la rapidez de carga de él o los reservorios de energía y asegurar que habrá suficiente energía para la inicialización de la etapa final, puesto que al desconectar la carga del resto del sistema se evita que haya alguna fuga de corriente indeseada. La conmutación será manejada por un transistor N-MOSFET que será alimentado por una salida del bloque anterior.

Las etapas de ACR se encuentran implementadas en el integrado LTC3108 (Anexo 7). Este es un convertidor de DC/DC que puede operar con entradas de voltajes mínimas de 20mV, empleando

un transformador de 1:100 externo. Cuenta con dos salidas de voltaje regulable a 2.35V, 3.3V, 4.1V o 5V y una salida fija a 2.2V, pensadas para alimentar microcontroladores o sensores. También cuenta con un sistema de carga para un reservorio externo, ya sean supercondensadores o baterías recargables, con que prolongar la vida útil del nodo. Este IC está diseñado para su uso en conjunto con un módulo de *energy harvesting* de distintos tipos, como termoeléctrico o solar, aunque también puede ser utilizado con una fuente de alimentación de mayor voltaje como puede ser una batería.

El elemento Seebeck GM200-127-14-10 (Anexo 8) fue elegido como fuente de *energy harvesting* por sus características de desempeño eléctrico, tamaño reducido, simplicidad de diseño y su rango de operación térmico, el cual se adecúa a las necesidades previstas por el nodo.

Los dispositivos de este tipo se encuentran conformados por múltiples termopares, los cuales se componen de material tipo-n conectado eléctricamente en serie con material tipo-p[39] (Figura 17).

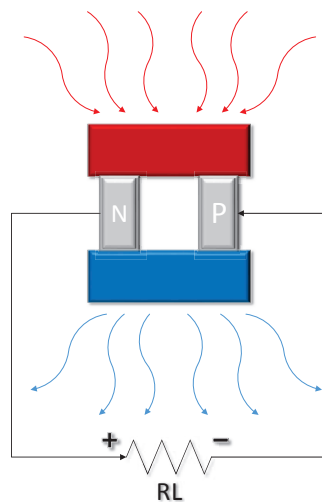


Figura 17 – Efecto Seebeck en un termopar

El efecto que utilizan estos elementos para la generación de electricidad se le conoce como efecto Seebeck, el cual se describe como una diferencia de potencial eléctrico que resulta de una distribución de temperatura no-uniforme en materiales conductores que no se encuentran sujetos a un campo magnético. Este fenómeno es el único de tipo calor-a-electricidad y el único termoeléctrico que ocurre sin la necesidad de una corriente eléctrica[41].

Como para cualquier máquina térmica, su eficacia térmica está determinada por la eficiencia de Carnot. Esta se define como la más alta eficiencia posible por una máquina térmica en operación entre dos reservorios termo-energéticos a temperaturas altas (T_c) y bajas (T_f).

$$n = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

La máxima eficiencia térmica se puede lograr si se provee la mayor cantidad de calor que puede soportar la máquina y, a la vez, se disipa el calor a la menor temperatura tolerable. Estas

variables de tolerancia se definirán acorde a las propiedades del material de la máquina y el disipador[42].

Para conocer el punto óptimo y potencial alcanzable del TEG seleccionado, se realizó un modelado del mismo a diferentes temperaturas y con distintas cargas de salida. Para esto se unió una de las caras del dispositivo a un radiador, con termostato regulable a distintos niveles, y a la otra cara se le sujetó un disipador de calor para obtener una mayor diferencia de potencial. Además, se esparció pasta térmica entre el radiador y el lado caliente del elemento Seebeck, para mejorar la transferencia de calor por conducción (Figura 18).

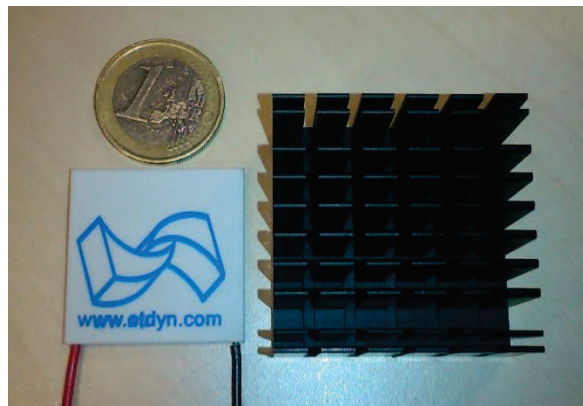


Figura 18 – Elemento Seebeck y disipador.

Transductores de este tipo han sido previamente estudiados por diversos autores, algunos trabajos que cabe mencionar son los realizados por Ramadass y Chandrakasan[39], Lhermet et al.[43] y Wang et al.[24]. Este último destaca de los demás ya que tiene un enfoque específico hacia WSN, pues se implementa un nodo sensor energizado con un transductor termoeléctrico, algo similar al propuesto en este trabajo. Sin embargo se diferencia de este trabajo esencialmente en la etapa de acondicionamiento de energía y comunicaciones. Wang et al. proponen para su nodo una fase de manejo de energía que consiste en un convertidor DC/DC de dos etapas para elevar una entrada de voltaje de 250mV provista por el TEG. La salida de este convertidor se encuentra conectada a un supercondensador, el cual es usado como reservorio energético. Éste a su vez está acoplado a una etapa adicional de regulación de voltaje para energizar el nodo sensor inalámbrico que se transmite información con un módulo de radio ZigBee (Figura 19).

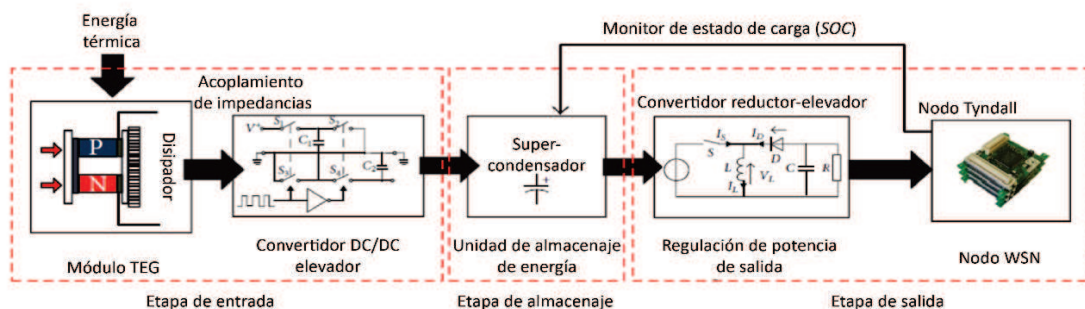


Figura 19 – Modelo de WSN con *harvesting* termoeléctrico propuesto por Wang et al.

Otra diferencia clave es que en este trabajo se realiza un estudio exhaustivo del comportamiento de la carga, refiriéndose por carga a la mencionada en el modelo de *harvesting* (Figura 5), ya que se cree que es de vital importancia para cualquier diseño relativo a bajo consumo pues permite tener una visión realista de las expectativas de longevidad del nodo de acuerdo al ciclo de trabajo empleado y factores adicionales.

5.1 Modelado del transductor

Esta prueba se realiza para validar los datos de operación descritos en la hoja de especificaciones del TEG, puesto que es posible encontrar variaciones. El experimento se realizó en condiciones de temperatura ambiente, 27°C aproximadamente, en un área aislada y con disipación pasiva (Figura 20). Los valores de diferencia de temperatura se extrajeron de la diferencia de temperatura entre la superficie del radiador y la temperatura ambiente.

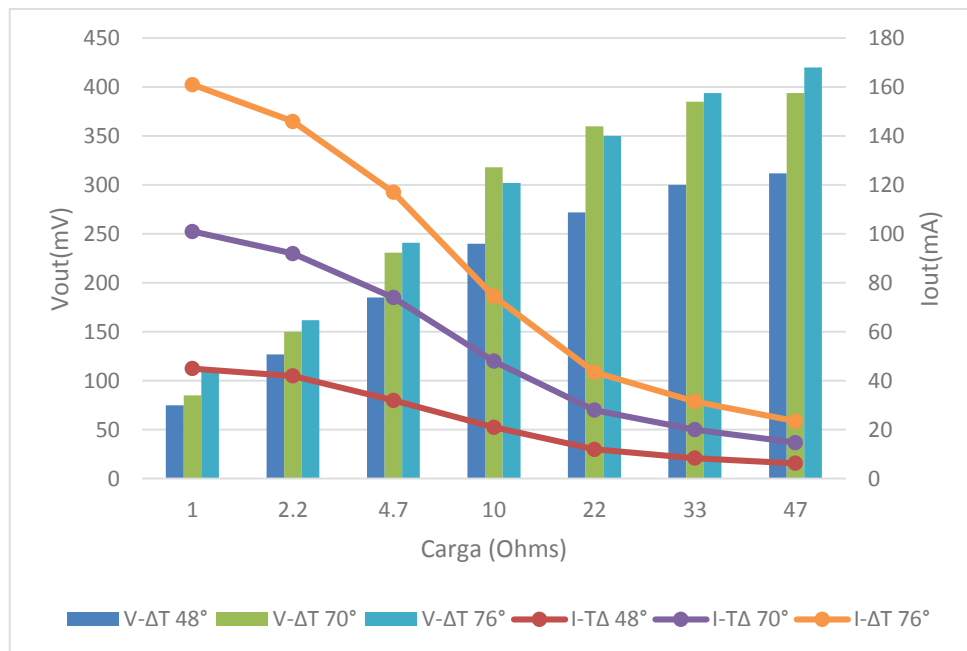


Figura 20 – Voltaje y corriente de salida a distintas cargas

Haciendo énfasis en el tipo de disipación usado, se entiende que en el supuesto de tener algún agente externo que pudiera ayudar a la disipación de calor sería posible extraer energía adicional del TEG.

Con los resultados obtenidos es posible encontrar la impedancia a la cual se puede extraer la mayor potencia y poder diseñar la etapa siguiente de la manera más eficiente (Figura 21). A pesar de lo descrito en la hoja de especificaciones del TEG, el punto de operación óptimo realmente se encuentra cerca de los 4.7Ω, aunque es posible seleccionar una carga mayor o menor, sin desviarse demasiado, y seguir obteniendo resultados aceptables.

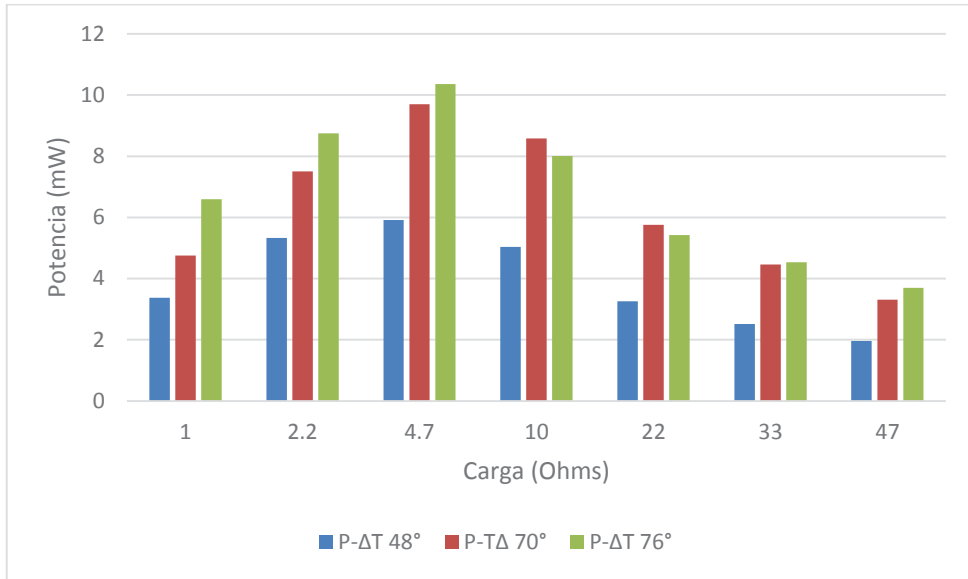


Figura 21 – Potencia de salida a diferentes cargas

5.2 Cálculos para el acondicionamiento de energía

Debido a que el integrado LTC3108 incluye la etapa de acondicionamiento previo y posterior al almacenaje, las pérdidas por acoplamiento entre etapas son minimizadas y los cálculos que se presentan son más sencillos (Figura 22). Sin embargo por la disposición del microcontrolador y radio transmisor, así como los ajustes que se requirieron para acoplar esta carga al integrado de acondicionamiento, es necesario hacer modificaciones a las formulas presentadas en la hoja de datos del dispositivo.

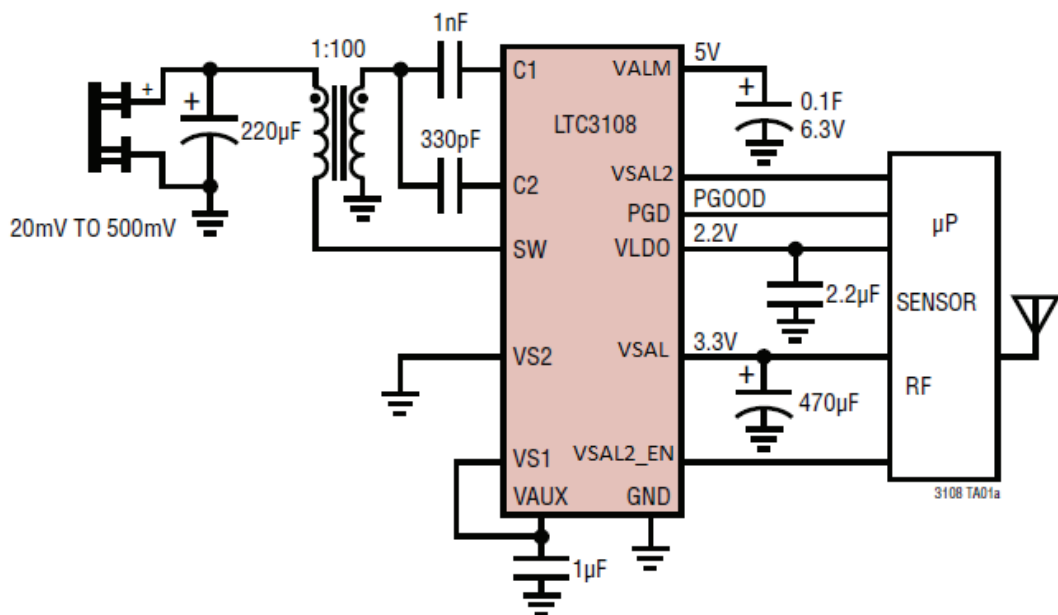


Figura 22 – Ejemplo de uso del IC LTC3108 (Anexo 4)

La principal desventaja de tener un módulo SoB en comparación de un sistema de arquitectura dual, es que al integrarlo con la etapa de acondicionamiento seleccionada, una misma salida debe de poder soportar a distintos patrones de consumo (pulsado, continuo, etc.). En el caso particular de este trabajo, habrá intervalos de sensado y transmisión con distintas demandas de consumo temporal/eléctrico. Esto plantea un problema de funcionamiento en el arranque debido a que las tensiones mínimas de funcionamiento de microcontrolador y módulo WiFi son diferentes: 2,2 V y 2,7 V respectivamente. Si se utiliza el módulo de acondicionamiento tal cual propone el fabricante, una vez que la tensión de salida fuera superior a 2,2 el sistema empezaría a consumir corriente pero no podría funcionar adecuadamente y ponerse en modo de dormido. Esto provocaría un consumo de potencia mayor que la potencia generada y por consiguiente el sistema no podría arrancar.

Para resolver este problema se ha añadido un circuito de temporización y se aprovecha la salida PGD del módulo que se eleva a 2.2V cuando el voltaje de V_{SAL} llega a un 93% de la tensión nominal seleccionada. Si el voltaje de V_{SAL} se llegará a bajar de un 90%, el pin PGD pasa a cero voltios. Así el circuito propuesto activa la compuerta el MOSFET cuando se supera el umbral del 93% de carga y la mantiene activa gracias al condensador (C8) durante un tiempo más allá si bajara del 90% de carga.

En la figura 23 se puede ver la disposición del MOSFET y los valores de los condensadores seleccionados.

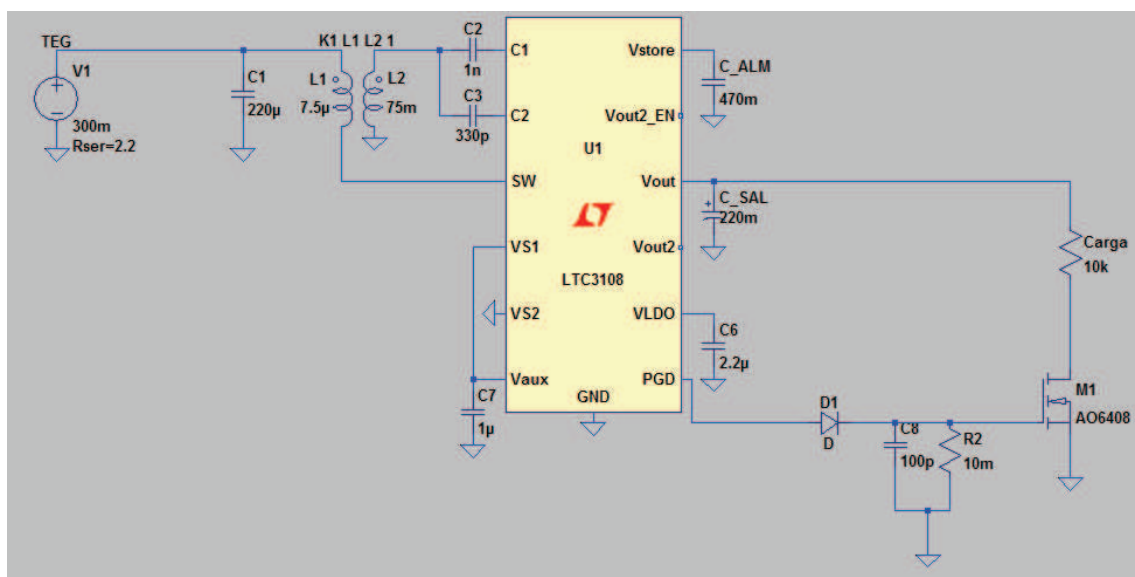


Figura 23 – Modelo de simulación del LTC3108

Para el escenario actual es necesario calcular el capacitor de salida (C_{SAL}), el capacitor de almacenaje (C_{ALM}), la corriente requerida por la carga (I_{CARGA}), el tiempo de carga del capacitor de la salida LDO (t_{LDO}) y el tiempo que tardará V_{salida} en llegar al voltaje seleccionado de 3.3V (t_{SAL}).

$$C_{SAL} \geq \frac{(I_{TX} * t_{TX}) + (I_{SENS} * t_{SENS})}{V_{CAIDA}}$$

$$C_{ALM} \geq \frac{6\mu A + I_{DORMIR} + I_{LDO_{dormir}} + (I_{TX} * t_{TX} * f_{TX}) + (I_{SENS} * t_{SENS} * f_{SENS})}{V_{MAX} - V_{SAL}} T$$

$$I_{CARGA} \geq I_{DORMIR} \frac{(I_{TX} * t_{TX})}{T_{TX}} + \frac{(I_{SENS} * t_{SENS})}{T_{SENS}}$$

$$t_{LDO} = \frac{2.2V * 2.2\mu F}{I_{VSAL} - I_{LDO_{dormir}}}$$

$$t_{SAL} = \frac{V_{SAL} * C_{SAL}}{I_{SAL} - I_{CARGA} - I_{LDO_{dormir}}} + t_{LDO}$$

Donde:

$I_{TX,SENS}$: Corriente media de transmisión/sensado.

$I_{DORMIR,VSAL}$: Corriente media de dormir/salida.

$I_{LDO_{dormir}}$: Corriente media entre pulsos que afectan a la salida LDO.

$t_{TX,SENS}$: Duración del intervalo transmisión/sensado en segundos.

T : Tiempo que se desea alimentar la carga.

$T_{TX,SENS}$: Tiempo entre intervalos de transmisión/sensado en segundos.

$f_{TX,SENS}$: Frecuencia del intervalo de transmisión/sensado.

El condensador C_{SAL} será el que controle el comportamiento a pulsos de la carga y C_{ALM} almacenará la energía sobrante del condensador de salida, a diferencia de otras implementaciones donde se tiene un único supercondensador que controla esta conducta impulsiva. La variable T definirá el tiempo que el condensador C_{ALM} podrá proveer energía a la V_{SAL} en caso de que el TEG deje de proveer. Además, sobre estos cálculos habrá que tomar en cuenta la adición del transistor N-MOSFET mencionado en el apartado 4.3.

Para la ratificación de la etapa de corte de carga se realiza una simulación en el entorno LTSpice IV, donde se encuentra un modelo preciso del integrado LTC3108. La validación del funcionamiento se muestra con un gráfico extraído de la simulación (Figura 24).

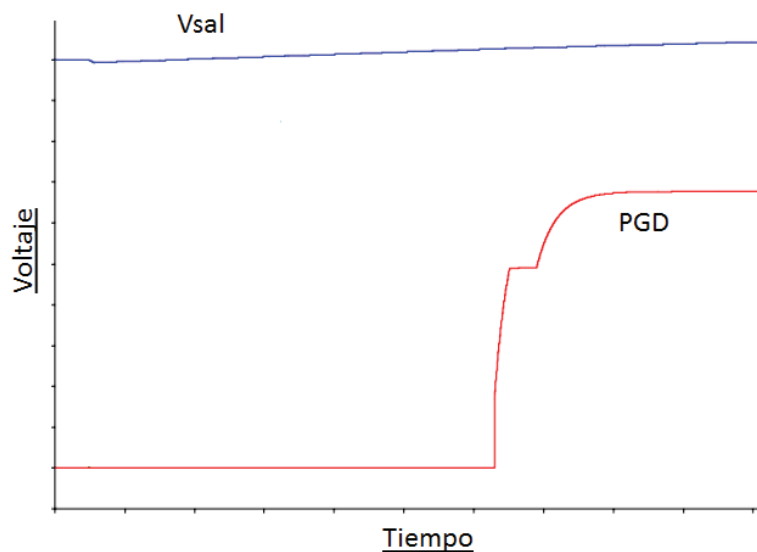


Figura 24 – Comportamiento de la etapa de ACR

Con el presente modelado del elemento Seebeck, es posible visualizar las expectativas de energía que se puede generar. Con esto se puede realizar el diseño de los elementos que compondrán cualquier etapa de ACR. Para este trabajo se propuso la implementación de un integrado que realizara esta función y se calcularon los dispositivos requeridos para alimentar la carga. El incluir una etapa de corte se presenta como un elemento adicional y resulta benéfico para una carga con una configuración SoB con una sola entrada de alimentación. El corte de la carga por parte del MOSFET permite que se carguen más eficientemente los condensadores y resulta en un aprovechamiento óptimo de la energía proporcionada por el TEG. La simulación comprueba la validez del diseño para alimentar una carga WiFi.

6 Conclusiones

En este trabajo se evaluó el consumo energético de un sensor inalámbrico de bajo consumo WiFi en diferentes modos de operación, con el propósito de comprobar la viabilidad de un sistema de este tipo. Parte de este trabajo está basado en modelos de publicaciones que analizan otros protocolos de comunicación para WSN. En este mismo trabajo se analiza un protocolo ZigBee para buscar los escenarios en que prevalece WiFi.

La validación del funcionamiento de un nodo con comunicaciones inalámbricas WiFi fue logrado con resultados favorables. Es posible sustentar el consumo de un *mote* WiFi para escenarios donde los paquetes de transmisión son elevados, haciéndolo inviable para protocolos como ZigBee. En casos donde el tamaño de paquete de transmisión es de unos cuantos bytes, WiFi resulta útil para implementaciones donde ya existe una red desplegada.

Es posible reducir los consumos de y obtener resultados mejores que los desplegados en este trabajo, si se optimiza el microcontrolador de la carga para consumir la menor corriente posible. Este factor resulta crucial, mas alla de la importancia del consumo del transceptor.

La simulación del circuito de *harvesting* y la etapa de ACR, certificó la viabilidad del uso fuentes de captación ambiental para nodos sensores WiFi. La etapa de corte de carga representa una gran ventaja al diseño propuesto en la hoja de esquemáticos del IC LT3108, pues favorece la carga de los condensadores a un nivel mucho mayor y, a su vez, evita que haya caídas de tensión cuando la carga aún no está activa.

Como líneas futuras de trabajo, sería interesante comparar una carga con arquitectura dual. Esto posiblemente permitiría una mejor identificación de consumos adicionales, los cuales, si fueran reducidos expandirían las posibilidades del nodo WiFi expuestas en este escrito. También la comprobación de la longevidad lograda por el modelo hibrido para almacenamiento de energía sería interesante.

7 Bibliografía

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", Computer Networks, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, J. Rabaey, Wireless Sensor Networks, vol. 2920, 2004, pp. 1-17.

- [3] C. Alippi, R. Camplani, C. Galperti, M. Roveri, "A Robust, Adaptive, Solar-Powered WSN Framework for Aquatic Environmental Monitoring," *Sensors Journal*, IEEE , vol.11, no.1, pp.45,55, Jan. 2011
- [4] B. O'Flynn, P. Angove, J. Barton, A. Gonzalez, J. O'Donoghue, J. Herbert, "Wireless Biomonitor for Ambient Assisted Living"
- [5] F.F. Forouzandeh, "Ultra Low Energy Communication Protocol for Implantable Wireless Body Sensor Networks" PhD Thesis, 2010.
- [6] S. Kim, S. Pakzad, D. Culler, J. Demmel, G. Ferves, S. Gleser, M. Turon, "Wireless Sensor Networks for Structural Health Monitoring", *SenSys'06*, 2006.
- [7] I. F. Akyildiz, E. P. Stuntebeck, "Wireless underground sensor networks: Research challenges", *Ad Hoc Networks*, vol. 4, 2006.
- [8] Stoianov, I.; Nachman, L.; Madden, S.; Tokmouline, T.; Csail, M., "PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring," *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on* , vol., no., pp.264,273, 25-27 April 2007
- [9] A. Hasler, I. Talzi, J. Beutel, C. Tschudin, S. Gruber "Wireless Sensor Networks in Permafrost Research Concept - Requirements, implementation and challenges", Ninth international conference on permafrost, pp.669-674.
- [10] E. M. Yeatman "Energy harvesting – small scale energy production from ambient sources", *SPIE Smart Structures/NDE*, 2009.
- [11] Penella, M.T.; Albesa, J.; Gasulla, M., "Powering wireless sensor nodes: Primary batteries versus energy harvesting," *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE* , vol., no., pp.1625,1630, 5-7 May 2009.
- [12] "Wi-Fi in sensor applications", whitepaper, RedPine Signals Corp., Apr. 2009.
- [13] Haartsen, J.C., "The Bluetooth radio system," *Personal Communications, IEEE* , vol.7, no.1, pp.28,36, Feb. 2000.
- [14] Starsinic, M., "System architecture challenges in the home M2M network," *Applications and Technology Conference (LISAT), 2010 Long Island Systems* , vol., no., pp.1,7, 7-7 May 2010.
- [15] Google maps (Online) <http://goo.gl/maps/9ci5K>, 2013.
- [16] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, X. P. Costa, B. Walke, "the IEEE 802.11 universe", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, Jan. 2010.
- [17] J. M. Hernández-Muñoz, J. B. Vercher, L. Muñoz, J. A. Galache, M. Presser, L. A. Hernández-Gómez, J. Patterson, "Smart cities at the forefront of the future internet", in *Future Internet Assembly*, J. Domingue et al., Eds. 2011, pp. 447-462.
- [18] "Wireless LAN medium access control and physical layer specifications" IEEE 802.11-2007, June 2007.
- [19] M.T. Penella, M. Gasulla, "A Review of Commercial Energy Harvesters for Autonomous Sensors", *Instruments and Measurement Technology Conference*, 2007.
- [20] Wonderful Engineering (Online) <http://wonderfulengineering.com/wp-content/uploads/2013/11/Free-Electricity-Folks.png>, 2013
- [21] Texas Instruments, http://www.ti.com/solution/energy_harvesting (Online), 2013.
- [22] M. L. Mateu, "Energy Harvesting from Passive Human Power", Phd Thesis, 2004.
- [23] "Storing Power with Super Capacitors", whitepaper, Skyworks Solutions Inc., Sept. 2012.
- [24] W. Wang, V. Cionca, N. Wang, M. Hayes, B. O'Flynn, C. O'Mathuna, "Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, Article ID 232438, 14 pages, 2013.

- [25]M. T. Penella, M. Gasulla “Runtime Extension of Low-Power Wireless Sensor Node Using Hybrid-Storage Units”, IEEE Transactions on circuits and systems, vol. 59, No. 4, 2010.
- [26]S. Tozlu, “Feasibility of Wi-Fi enabled sensor for internet of things”, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp. 291-296, July 2011.
- [27]“Low power Wi-Fi (IEEE 802.11) for IP smart objects”, whitepaper, GainSpan Corp., 2009.
- [28]Huang, K.D.; Malone, D.; Duffy, K.R., "The 802.11g 11 Mb/s Rate is More Robust than 6 Mb/s," *Wireless Communications, IEEE Transactions on* , vol.10, no.4, pp.1015,1020, April 2011.
- [29]D. Halpernin, B. Greenstein, A. Sheth, D. Wetherall “Demystifying 802.11n Power Consumption”.
- [30]IEEE 802.11i, IEEE Standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements-Part11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 6: Medium Access Control (MAC) security enhancements, 2004.
- [31]A. S. Aransay, “Seguridad en Wi-Fi”, 2009.
- [32]Lashkari, A.H.; Danesh, M.M.S.; Samadi, B., "A survey on wireless security protocols (WEP, WPA and WPA2/802.11i)," *Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009. 2nd IEEE International Conference on* , vol., no., pp.48,52, 8-11 Aug. 2009.
- [33]M. J. Donahoo, K. L. Calvert, “TCP/IP Sockets in C: Practical Guide for Programmers”, Morgan Kaufmann, 2009.
- [34]P. Atelin, J. Dordoigne, “TCP/IP y protocolos de internet”, Colección technote, 2007.
- [35]Folea, S.; Ghercioiu, M., "Ultra-low power Wi-Fi tag for wireless sensing," *Automation, Quality and Testing, Robotics, 2008. AQTR 2008. IEEE International Conference on* , vol.3, no., pp.247,252, 22-25 May 2008.
- [36]Tozlu, S.; Senel, M.; Wei Mao; Keshavarzian, A., "Wi-Fi enabled sensors for internet of things: A practical approach," *Communications Magazine, IEEE* , vol.50, no.6, pp.134,143, June 2012.
- [37]IEEE Standard 1451.5, IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators—wireless communication protocols and transducer electronic data sheet (TEDS) formats, IEEE, 2007.
- [38]A. Asensio, R. Blasco, A. Marco, R. Casas, “Hardware architecture design for WSN runtime extensión”, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2013, pp. 1-11, 2013.
- [39]P. Kinney, “ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works”, Communications Design Conference, 2003.
- [40]Ramadass, Y.K.; Chandrakasan, A.P., "A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35 mV Startup Voltage," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of* , vol.46, no.1, pp.333,341, Jan. 2011.
- [41]ASTM Committee E20 on Temperature Measurement (1993). Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement (4th Edition)
- [42]E. Rathakrishnan “Fundamentals of Engineering Thermodynamics” Second Edition, 2006.
- [43]Lhermet, H.; Condemine, C.; Plissonnier, M.; Salot, R.; Audebert, P.; Rosset, M., "Efficient Power Management Circuit: From Thermal Energy Harvesting to Above-IC Microbattery Energy Storage," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of* , vol.43, no.1, pp.246,255, Jan. 2008.

Wifi Sensor Networks: A study of energy consumption.

Carlos A. Trasviña-Moreno*, Ángel Asensio, Roberto Casas, Rubén Blasco, Álvaro Marco.

Institute of Engineering Research (I3A)

University of Zaragoza

Zaragoza, Spain

*ctrasvina@humanopenware.com

Abstract— This paper describes an energy consumption analysis of a wireless sensor node with a Wifi transceiver and its feasibility in smart city developments. A description of energy budgeting strategies are detailed, from which a theoretical calculus is made to validate the node setup energy wise. Afterwards, a practical measurement of the consumption is effected with TCP/UDP transmission protocols and various scenarios. A final comparison is made with a common battery module to give an idea of the longevity obtainable.

Index Terms— Wifi, energy consumption, smart city, sensor, WSN.

I. INTRODUCTION

Wireless Sensor Networks (WSN) provide key information that help improve the way of life without the need of human interaction [1, 2]. These deployments demand low power design methodologies and strategies that can effectively manage the amount of energy provided to expand the lifespan of systems as much as possible [3].

Wireless communications are one of the greatest, if not the highest, energy consuming sections a sensor node can present. Due to this it is common, in WSN, the usage of low power protocols like Zigbee, Bluetooth and proprietary protocols, amongst others [4]. These present the most energy efficient solutions commonly known, although they are not usual amongst non-technical users and have little to no existing infrastructure overlaid in metropolitan areas. On the other hand, 802.11 based protocols have a very widespread network with a high market penetration, which enables users to easily receive and transmit information from almost any handheld device or its own computer, yet it is not commonly utilized in sensing applications.

One of the primary reasons why this is thought is due to the idea that WiFi is a very power hungry protocol that can be used for high data streaming exclusively [5]. While this is partially true, it also presents new developments that may be applied to sensing activities. Current protocols advancements, merged with power saving strategies and low power electronics is thought to enable WiFi WSN in smart city environments [6].

The analysis of this hypothesis will be the key focus of this paper and will be discussed in the following sections.

II. SENSOR DEFINITION

A sensor network may have a vast amount of nodes, which will behave in different ways. According to the relationship with its environment, they can be classified in sensors, actuators, interfaces, gateways and routers. Some nodes may present one or more of these capabilities.

A vast amount of the WSN systems are focused mainly on sensing only. This means that the device will extract the required information and transmit to a higher system without interaction with other nodes. Taking this in account, there are some basic operation strategies can be considered:

- On-time measurement and transmission. The rate for measurement and transmission may be the same or several measurements can be clustered and then sent as a whole.
- Threshold analysis. Measurements are done by interruption triggered events or on-time scheduling and transmission only if user defined conditions are met.
- Real-time sensor availability. The node will always “hear” the needs of the system, thus measuring and transmitting when required.

The first two options can satisfy the majority of applications that have the need for sensing capabilities. It is possible to opt for a state of “sleep” for the communication node most of time, as messages will be sent only on predefined conditions. In the last scenario, it is not possible to satisfy this condition as the wireless sensor may be called at any time for its contribution.

Said this, in most cases, a WSN can be considered as a series of sensor devices that report information to a system. This definition adapts to a scenario of a WiFi system, associated to a central Access Point (AP) in infrastructure mode, in which the communication system is inactive the majority of time [7].

III. WIFI COMMUNICATIONS

The general idea of WiFi is that it is not suitable for stand-alone sensing applications, due to initial Wifi standards which were oriented to high data streaming on PC environments (Human-Machine interaction) where power consumption was not a factor.

With the arrival of concepts such as “Internet of Things” came new necessities to fulfill [8], where interaction would deviate from the original H2M scenario to a more M2M (Machine-Machine) schema and energy management would play a key role. Seeing as the primary focus of WiFi was not low power operation, new transceivers were developed with sleep and hibernate modes, as well as faster transition timings between active and inactive states [9], which allow WiFi nodes to be able to operate for long periods of time with a strict energy budget. IEEE 802.11 standards, such as 802.11g, can invoke a Power Save (PS) mode where an Access Point (AP) buffers data destined to a node, keeping the wireless station in sleep mode the majority of time until needed. Also new protocols to such as 802.11n are introduced, utilizing dual-band (2.4 GHz and 5 GHz) channels with 20 MHz or 40 MHz bandwidth and multiple-in multiple-out (MIMO) capabilities [5]. This allows an array of up to four antennas that enable spatial multiplexing or beam forming, for an increased data rate performance and a wider network range. Although 802.11n can be understood as a super high capacity streaming protocol, it is not exclusive and features like high data rate transfer can be employed on low power systems vastly reducing the transmission time [10].

IV. FINITE STATE MACHINE

With the previously stated, a model that represents the main activities from a more general perspective is sought out. For this, the on-time measurement and transmission (OTMT) strategy will be used to define the systems operating functionality.

Based on the work of Asensio, Blasco, Marco and Casas [11], a Finite State Machine (FSM, Figure 1) is proposed to describe the Wifi sensing node. The same three basic states are maintained, as from the original work, but modifications are made to better suit the current scenario.

1. Initialization state: Hardware start-up (oscillator warm up, peripheral initialization, etc.).
2. Active state: Sensing tasks are defined in this section as well as data transmission. Sensing tasks are defined in this section as well as data transmission. While sensing, the node will be required to enable the sensor peripheral AD converter for the data acquisition and disable it once the task is concluded. In the case of message broadcasting, the radio module will need to join the network, report the data and close the connection to avoid energy consumption.
3. Low power state: Radio module will be turned off, microcontroller will be maintained in sleep mode and all peripherals will be disabled or turned to the lowest consumption state.

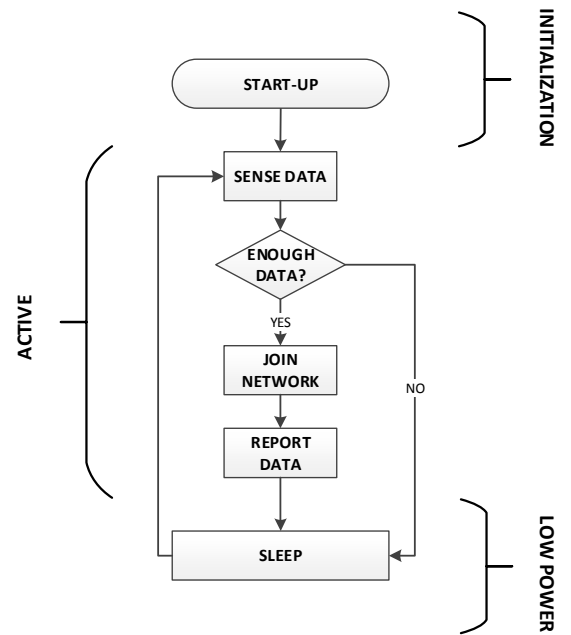


Figure 1- WiFi Finite State Machine node

V. THEORETICAL POWER CONSUMPTION ANALYSIS

Continuing with the proposal of Asensio, Blasco, Marco and Casas [11], a theoretical analysis is used to quantify the amount of energy consumed in different stages.

Consumption states are defined and divided in sub-states so as to clearly depict each fundamental activity and how it affects the overall performance (Table 1). Also, for each sub-state, equations are formulated to have a generalized methodology for different hardware setups and swiftly calculate the amount of charge used on each step. All the data utilized in these calculations can be extracted from datasheets and application notes (Table 2).

In a normal node life cycle the initialization step will only run once or a few times, considering a worst case scenario where hard resets are applied. With this assumption it is possible to infer that the initialization step can be overlooked, as it represents a negligible portion of the utilized charge. Thus, the total consumed charge per cycle can be simplified as follows:

$$Q_{CYCLE} = Q_{SENSE} + Q_{JOIN} + Q_{REPORT} + Q_{SLEEP} \quad (1)$$

Table 1-Power modes for uC and RM

	Power mode 0 (PM ₀)	Power mode 1 (PM ₁)	Power mode 2 (PM ₂)	Power mode 3 (PM ₃)
uC	Deep sleep (low power RTCC running)	High power (fast oscillator)	Not applicable	Not applicable
RM	Deep sleep or powered off	Not applicable	Rx on	Tx on

Table 2- Charge consumption by sub-state for an operating cycle*

STATES	SUB-STATES	CALCULATION
Initialization	Disable peripherals	$I_{UC_2} \times t_{INIT} + Q_{UC_{INIT}}$
	Initialize variables	
	RTCC initialization	
	RTCC alarm startup	
Sense data	Change power mode	$Q_{UC_{0-1}}$
	Activate sensor and peripheral port	$I_{UC_2} \times t_{SENSOR}$
	Acquire data	$(I_{UC_2} + I_{SENSOR}) \times t_{ACQ}$
Join network	Change power mode	$I_{UC_2} \times t_{RM_{0-1}} + Q_{RM_{0-1}}$
	Transmit connection message	$(I_{UC_2} + I_{RM_2}) \times t_{CTX}$
	Wait for acknowledgment from the AP	$(I_{UC_2} + I_{RM_2}) \times t_{CTX}$
Report data	Change power mode	$I_{UC_2} \times t_{RM_{1-2}} + Q_{RM_{1-2}}$
	Transmit data	$(I_{UC_2} + I_{RM_2}) \times t_{TX}$
	Change power mode	$I_{UC_2} \times t_{RM_{1-2}} + Q_{RM_{1-2}}$
	Receive ACK (optional)	$(I_{UC_2} + I_{RM_2}) \times t_{ACK}$
	Detach from server and close connection	$(I_{UC_2} + I_{RM_2}) \times t_{CLOSE}$
Sleep	Change power mode	$Q_{UC_{1-0}} + Q_{RM_{1-0}}$
	Sleep	$I_{UC_2} \times t_{SLEEP}$

* Where: $I_{UC,RM_{0,1,2}}$: Current consumed by uC and RM in power modes 0,1,2 and 3 respectively. $Q_{UC,RM_{0,1,2}}$: Charge drained by uC and RM in transitions between corresponding power modes. $Q_{UC_{INIT}}$: Charge drained by uC in initialization. t_{SENSOR} : Time needed by the sensor to startup operations. I_{SENSOR} : Current drawn by the sensor while obtaining data. t_{ACQ} : Time needed by the uC for data acquisition from the sensing entities, e.g. A/D conversion. t_{CTX} : Time needed by the RM to transmit a connection message to the central AP. t_{CONRX} : Time needed by the RM to receive an acknowledgment message from the central AP. t_{TX} : Time needed to transmit data from the RM the central AP. t_{ACK} : Time needed to receive the acquisition message between RM and central AP. t_{CLOSE} : Time needed to close communications between RM and central AP. t_{SLEEP} : Time in sleep mode.

To have a full view of the capabilities of a Wifi sensor node, a comparison between different transmission protocols will be made. For each, there will be an analysis of time and current consumption for different package sizes. In addition, various sensing and data delivery situations will be assessed, so as to view the variations in power expenditure (Appendix A).

VI. DESCRIPTION OF THE AUTONOMOUS SENSOR

For the validation of the previous hypothesis, an analysis of a wireless sensor node will be used. For such a setup, the following components have been selected.

- PIC24FJ256GA106 microcontroller.
- MRF24WB0MA 802.11b Wifi transceiver.

- Real ICE power monitor and Tektronix oscilloscope
- LM35 temperature sensor
- Belkin 802.11n wireless router.

The microcontroller and transceiver were selected due to their low power operation modes and relative fast transition times. The PIC24FJ256GA106 and MRF24WB0MA can operate from a 2.7 V to a 5.0 V power source, which will alter the amount of current drawn, including leakage losses. Although not the best in class, these devices depict a mean for low power electronics and, consequently, provide a non-optimal scenario as a basis for this paper.

Microchip's Real ICE power monitor will be utilized to quantify the amount of current employed and to measure the period of time in which the node is in active state. This module can measure currents from 1mA to 1A with a precision of one sample per microsecond. For greater resolution analysis, the Tektronix oscilloscope will be put to use.

VII. TEST SETUP AND VARIABLE ANALYSIS

A real time comparison between TCP and UDP transmission protocols will be made. For each, there will be a time measurement analysis for different package sizes. From this data a statistical mean will be calculated to represent the effort of the wireless node to deliver data to the network. In addition, various sensing and transmission scenarios will be assessed, so as to view the variations in power expenditure (Table 3).

VIII. RESULTS

With the prior setup and technical data provided by the manufacturers, the current consumed as well as the time in each transition or phase have been quantified (Table 4). This will provide a good estimation for the calculations of different scenarios with various timelines, so as to find the appropriate context where this type of deployment is viable.

The results thrown by the theoretical analysis displayed adequate conditions to proceed with the development of the wireless node. To visualize and capture the actual node con-

Table 3-Sensing and transmission scenarios

Scenario #	Sensing Time	Transmission Time
1	10s	1h
2	60s	1h
3	600s	1h
4	1h	1h
5	600s	600s
6	10s	600s
7	600s	24h
8	60s	4h
9	600s	3h

Table 4 – Current and time consumption from datasheets

	POWER CONSUMPTION	
	uC	RM
I_0	10 μ A	---
I_1	24 mA	---
I_2	---	89 mA
I_3	---	154 mA
I_{SENSOR}	1 mA	---
$Q_{\text{UC_INIT}}$	769.16 μ C	---
$Q_{0 \rightarrow 1}$	2.13 μ C	---
$Q_{0 \rightarrow 2}$	---	13.35 mC
$Q_{2 \rightarrow 3}$	---	1.21 μ C
$Q_{3 \rightarrow 2}$	---	1.21 μ C
$Q_{2 \rightarrow 0}$	---	8.9 μ C
$Q_{1 \rightarrow 0}$	2.13 μ C	---
t_{INIT}	64.07 ms	---
$t_{0 \rightarrow 1}$	178 μ s	---
$t_{0 \rightarrow 2}$	---	300.2 ms
$t_{3 \rightarrow 2}$	---	10 μ s
$t_{2 \rightarrow 0}$	---	200 μ s
$t_{1 \rightarrow 0}$	178 μ s	---
t_{SENSOR}	225 ns	---
t_{ACQ}	975 ns	---
t_{CON}	---	3.6 s
t_{TX}	---	4 ms
t_{ACK}	---	128 μ s
t_{CLOSE}	---	500 ms

sumption of the setup, the Real ICE power monitor is put to use.

The waveform of the consumption in the active state is visualized to depict the various activities on sensing and transmitting operation (Figure 2). To obtain the average current consumption thru-out this phase, a trapezoidal integration is realized and the result is divided amongst the maximum number data points obtained. Furthermore, the different package size transmissions are evaluated for each protocol, giving an idea of real delivery times (Table 5).

Table 5-Data transmission times

Data Transmission Time (ms)				
Protocol	1byte	10bytes	100bytes	1k
UDP	4.081	4.1	6.079	9.999
TCP	12.24	12.32	14.08	20

As expected, UDP presents a faster transmission time as it does not need an acknowledgment message from the AP, thus making a faster transition to a sleep state. The ACK reception

represents a time difference which increases depending on the amount of data transmitted. On the other hand, TCP will guarantee the reception of data to the AP. Seeing as the time difference represents a miniscule portion in the overall transmission state, it can be preferable to have this assurance over a faster message deliverance.

Having selected different scenarios in which the node could operate, the comparison is made between TCP and UDP transmission in an open Wifi network (Table 3). Afterwards the results are matched to a generic rechargeable Nimh battery array, which provides a 3.6V output with a capacity of 2400mAh, to have an idea of the lifespan of the node with a full charge of the storage unit (Figure 2).

Although unexpected, TCP transmissions present a more economical solution than UDP for this specific node setup. This is due to the time it takes our current setup to open a UDP socket, which in the end adds 300ms to the active state. Given these results, it will be preferable to use TCP even when data transmissions are longer due to the ACK message wait. For bigger data packages, like when streaming video or audio, UDP compensates for those 300ms of offset and can be a more viable solution. Also, it can be easily depicted that increasing the amount of transmissions drastically affects the overall consumption. It is may be better to accumulate data from a wide amount of sensing events and send the bulk in a few deliveries. In scenarios where sensing operation is maintained for extended periods of time, the sleep current plays a key role in the total consumption, as can be seen in scenarios 7 thru 9. Additionally the influence of the amount of transmissions affects greatly the longevity, as can be seen.

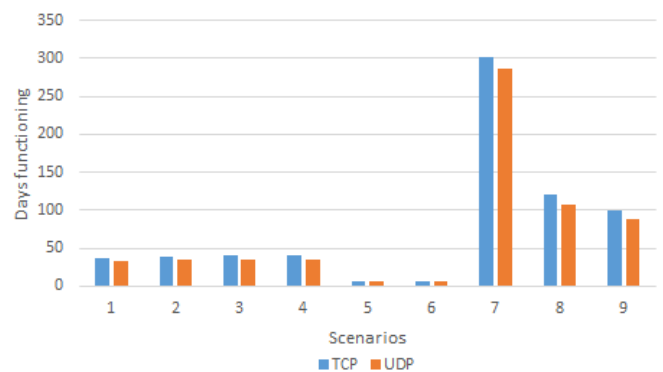


Figure 2 – Lifespan protocol comparison

IX. CONCLUSIONS

In this paper we evaluated the energy consumption of a low power wireless sensor node within different operating scenarios with the purpose of verifying the feasibility of a Wifi node deployment in a metropolitan environment. Part of this study is based on previously published models that analyzed other communication protocols for WSN.

From the theoretical analysis, based on the proposed strategy, the highest consumption states have been identified. At first glance the states in which the transceiver is enabled

seem to play the most significant role in the study, as radio transmissions represent the highest energy cost of a cycle. In reality, it is the sleep state which affects the most, as more than 90% of the time this is the active phase. Using an OTMT strategy, a significant reduction in the overall power demand will come if the sleep current is minimized, even greater than reducing the active state current.

The measurements show that with proper energy budgeting strategies it is possible to enable mid-range low power Wifi node for sensing applications, accentuating the idea that Wifi can no longer be excluded as a possibility for WSN deployments. It is possible to mediate between a fair amount of sensing repetitions and transmissions to the network without having an increased the amount of current consumed. With a descent sized energy storage, it is possible to have the node functioning for a few days without the necessity of recharging the battery. Additionally, with the high data transmission ratio it is possible to send large loads of information without significantly affecting the overall consumption.

Being a well-known and widely used protocol, it simplifies the interaction with non-technical users making it feasible to have a DIY sensor kit for deployment in a wide variety of metropolitan spaces. Additionally, having IP based devices facilitates the interaction with handheld devices, such as smartphones, and enables cloud computing nodes. Although not currently suited for all sensing activities, Wifi technologies can be fitted to scenarios in which a given variable must be monitored for posterior data mining and other similar cases.

With cutting edge low power electronics it is possible to diminish the amount of energy consumed, granting a longer node life with a lesser battery recharge rate. Also, by lowering the power demand it could be possible to use ambient sources to energize the node which would reduce the interaction of the user with the device making it more autonomous.

ACKNOWLEDGMENT

Trasviña-Moreno thanks Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for providing a scholarship for a Master's Degree study.

REFERENCES

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su*, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393-422, 2002.
- [2] S. Roundy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, J. Rabaey, *Wireless Sensor Networks*, vol. 2920, 2004, pp. 1-17.
- [3] "Wi-Fi in sensor applications", whitepaper, RedPine Signals Corp., Apr. 2009
- [4] Starsinic, M., "System architecture challenges in the home M2M network," *Applications and Technology Conference (LISAT), 2010 Long Island Systems* , vol., no., pp.1,7, 7-7 May 2010.
- [5] G. R. Hiertz, D. Denteneer, L. Stibor, Y. Zang, X. P. Costa, B. Walke, "the IEEE 802.11 universe", *Communications Magazine*, IEEE, vol. 48, no. 1, pp. 62-70, Jan. 2010.
- [6] J. M. Hernández-Muñoz, J. B. Vercher, L. Muñoz, J. A. Galache, M. Presser, L. A. Hernández-Gómez, J. Patterson, "Smart cities at the forefront of the future internet", in *Future Internet Assembly*, J. Domingue et al., Eds. 2011, pp. 447-462.
- [7] "Wireless LAN medium access control and physical layer specifications" IEEE 802.11-2007, June 2007.
- [8] S. Tozlu, "Feasibility of Wi-Fi enabled sensor for internet of things", *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 291-296, July 2011.
- [9] "Low power Wi-Fi (IEEE 802.11) for IP smart objects", whitepaper, GainSpan Corp., 2009.
- [10] D. Halperin, B. Greenstein, A. Sheth, D. Wetherall "Demystifying 802.11n Power Consumption"
- [11] A. Asensio, R. Blasco, A. Marco, R. Casas, "Hardware architecture design for WSN runtime extensión", *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1-11, 2013.



PIC24FJ256GA110 Family Data Sheet

64/80/100-Pin, 16-Bit,
General Purpose Flash Microcontrollers
with Peripheral Pin Select

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip devices in life support and/or safety applications is entirely at the buyer's risk, and the buyer agrees to defend, indemnify and hold harmless Microchip from any and all damages, claims, suits, or expenses resulting from such use. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, dsPIC, KEELOQ, KEELOQ logo, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, rfPIC and UNI/O are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


FilterLab, Hampshire, HI-TECH C, Linear Active Thermistor, MXDEV, MXLAB, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analogue-for-the-Digital Age, Application Maestro, CodeGuard, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, dsSPEAK, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, HI-TIDE, In-Circuit Serial Programming, ICSP, Mindi, MiWi, MPASM, MPLAB Certified logo, MPLIB, MPLINK, mTouch, Octopus, Omniscient Code Generation, PICC, PICC-18, PICDEM, PICDEM.net, PICKit, PICtail, PIC³² logo, REAL ICE, rFLAB, Select Mode, Total Endurance, TSHARC, UniWinDriver, WiperLock and ZENA are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2009, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip received ISO/TS-16949:2002 certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona; Gresham, Oregon and design centers in California and India. The Company's quality system processes and procedures are for its PIC[®] MCUs and dsPIC[®] DSCs, KEELoq[®] code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, nonvolatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.



MICROCHIP

PIC24FJ256GA110 FAMILY

64/80/100-Pin, 16-Bit, General Purpose Flash Microcontrollers with Peripheral Pin Select

Power Management:

- On-Chip 2.5V Voltage Regulator
- Switch between Clock Sources in Real Time
- Idle, Sleep and Doze modes with Fast Wake-up and Two-Speed Start-up
- Run mode: 1 mA/MIPS, 2.0V Typical
- Standby Current with 32 kHz Oscillator: 2.6 μ A, 2.0V Typical

High-Performance CPU:

- Modified Harvard Architecture
- Up to 16 MIPS Operation at 32 MHz
- 8 MHz Internal Oscillator
- 17-Bit x 17-Bit Single-Cycle Hardware Multiplier
- 32-Bit by 16-Bit Hardware Divider
- 16 x 16-Bit Working Register Array
- C Compiler Optimized Instruction Set Architecture with Flexible Addressing modes
- Linear Program Memory Addressing, Up to 12 Mbytes
- Linear Data Memory Addressing, Up to 64 Kbytes
- Two Address Generation Units for Separate Read and Write Addressing of Data Memory

Analog Features:

- 10-Bit, Up to 16-Channel Analog-to-Digital (A/D) Converter at 500 ksp/s:
 - Conversions available in Sleep mode
- Three Analog Comparators with Programmable Input/Output Configuration
- Charge Time Measurement Unit (CTMU)

Peripheral Features:

- Peripheral Pin Select:
 - Allows independent I/O mapping of many peripherals at run time
 - Continuous hardware integrity checking and safety interlocks prevent unintentional configuration changes
 - Up to 46 available pins (100-pin devices)
- Three 3-Wire/4-Wire SPI modules (supports 4 Frame modes) with 8-Level FIFO Buffer
- Three I²C™ modules support Multi-Master/Slave modes and 7-Bit/10-Bit Addressing
- Four UART modules:
 - Supports RS-485, RS-232, LIN/J2602 protocols and IrDA®
 - On-chip hardware encoder/decoder for IrDA
 - Auto-wake-up and Auto-Baud Detect (ABD)
 - 4-level deep FIFO buffer
- Five 16-Bit Timers/Counters with Programmable Prescaler
- Nine 16-Bit Capture Inputs, each with a Dedicated Time Base
- Nine 16-Bit Compare/PWM Outputs, each with a Dedicated Time Base
- 8-Bit Parallel Master Port (PMP/PSP):
 - Up to 16 address pins
 - Programmable polarity on control lines
- Hardware Real-Time Clock/Calendar (RTCC):
 - Provides clock, calendar and alarm functions
- Programmable Cyclic Redundancy Check (CRC) Generator
- Up to 5 External Interrupt Sources

PIC24FJ Device	Pins	Program Memory (Bytes)	SRAM (Bytes)	Remappable Peripherals						I ² C™	10-Bit A/D (ch)	Comparators	PMP/PSP	JTAG	CTMU
				Remappable Pins	Timers 16-Bit	Capture Input	Compare/PWM Output	UART w/ IrDA®	SPI						
128GA106	64	128K	16K	31	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
192GA106	64	192K	16K	31	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
256GA106	64	256K	16K	31	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
128GA108	80	128K	16K	42	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
192GA108	80	192K	16K	42	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
256GA108	80	256K	16K	42	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
128GA110	100	128K	16K	46	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
192GA110	100	192K	16K	46	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y
256GA110	100	256K	16K	46	5	9	9	4	3	3	16	3	Y	Y	Y



MRF24WB0MA/MRF24WB0MB

Data Sheet

2.4 GHz, IEEE Std. 802.11b™
RF Transceiver Module

Note the following details of the code protection feature on Microchip devices:

- Microchip products meet the specification contained in their particular Microchip Data Sheet.
- Microchip believes that its family of products is one of the most secure families of its kind on the market today, when used in the intended manner and under normal conditions.
- There are dishonest and possibly illegal methods used to breach the code protection feature. All of these methods, to our knowledge, require using the Microchip products in a manner outside the operating specifications contained in Microchip's Data Sheets. Most likely, the person doing so is engaged in theft of intellectual property.
- Microchip is willing to work with the customer who is concerned about the integrity of their code.
- Neither Microchip nor any other semiconductor manufacturer can guarantee the security of their code. Code protection does not mean that we are guaranteeing the product as "unbreakable."

Code protection is constantly evolving. We at Microchip are committed to continuously improving the code protection features of our products. Attempts to break Microchip's code protection feature may be a violation of the Digital Millennium Copyright Act. If such acts allow unauthorized access to your software or other copyrighted work, you may have a right to sue for relief under that Act.

Information contained in this publication regarding device applications and the like is provided only for your convenience and may be superseded by updates. It is your responsibility to ensure that your application meets with your specifications. MICROCHIP MAKES NO REPRESENTATIONS OR WARRANTIES OF ANY KIND WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, WRITTEN OR ORAL, STATUTORY OR OTHERWISE, RELATED TO THE INFORMATION, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ITS CONDITION, QUALITY, PERFORMANCE, MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE. Microchip disclaims all liability arising from this information and its use. Use of Microchip devices in life support and/or safety applications is entirely at the buyer's risk, and the buyer agrees to defend, indemnify and hold harmless Microchip from any and all damages, claims, suits, or expenses resulting from such use. No licenses are conveyed, implicitly or otherwise, under any Microchip intellectual property rights.

Trademarks

The Microchip name and logo, the Microchip logo, dsPIC, KEELOQ, KEELOQ logo, MPLAB, PIC, PICmicro, PICSTART, PIC³² logo, rfPIC and UNI/O are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.


FilterLab, Hampshire, HI-TECH C, Linear Active Thermistor, MXDEV, MXLAB, SEEVAL and The Embedded Control Solutions Company are registered trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

Analog-for-the-Digital Age, Application Maestro, CodeGuard, dsPICDEM, dsPICDEM.net, dsPICworks, dsSPEAK, ECAN, ECONOMONITOR, FanSense, HI-TIDE, In-Circuit Serial Programming, ICSP, Mindi, MiWi, MPASM, MPLAB Certified logo, MPLIB, MPLINK, mTouch, Octopus, Omniscient Code Generation, PICC, PICC-18, PICDEM, PICDEM.net, PICkit, PICtail, REAL ICE, rFLAB, Select Mode, Total Endurance, TSHARC, UniWinDriver, WiperLock and ZENA are trademarks of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries.

SQTP is a service mark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A.

All other trademarks mentioned herein are property of their respective companies.

© 2010, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 Printed on recycled paper.

ISBN: 978-1-60932-155-0

Microchip received ISO/TS-16949:2002 certification for its worldwide headquarters, design and wafer fabrication facilities in Chandler and Tempe, Arizona; Gresham, Oregon and design centers in California and India. The Company's quality system processes and procedures are for its PIC® MCUs and dsPIC® DSCs, KEELoq® code hopping devices, Serial EEPROMs, microperipherals, nonvolatile memory and analog products. In addition, Microchip's quality system for the design and manufacture of development systems is ISO 9001:2000 certified.

**QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==**



MICROCHIP MRF24WB0MA/MRF24WB0MB

MRF24WB0MA/MRF24WB0MB Data Sheet 2.4 GHz IEEE Std. 802.11b™

Features:

- IEEE Std. 802.11-compliant RF Transceiver
- Serialized unique MAC address
- Data Rate: 1 and 2 Mbps
- IEEE Std. 802.11b/g/n compatible
- Small size: 21mm x 31mm 36-pin Surface Mount Module
- Integrated PCB antenna (MRF24WB0MA)
- External antenna option (MRF24WB0MB) with ultra miniature coaxial (U.FL) connector
- Range: up to 400m (1300 ft.)
- Easy integration into final product – accelerates product development, provides quicker time to market
- Radio regulation certification for United States (FCC), Canada (IC), Europe (ETSI) and Japan (ARIB)
- Wi-Fi® certified (WFA ID: WFA7150)
- Designed for use with Microchip microcontroller families (PIC18, PIC24, dsPIC33, and PIC32) with downloadable Microchip TCP/IP Stack

Operational:

- Single operating voltage: 2.7V-3.6V (3.3V typical)
- Temperature Range: 0° C to +70° C Commercial
- Simple, four-wire SPI interface with interrupt
- Low-current consumption:
 - RX mode – 85 mA (typical)
 - TX mode – 154 mA (+10 dBm typical)
 - Sleep – 250 µA (typical)
 - Hibernate – <0.1 µA (typical)

RF/Analog Features:

- ISM Band 2.400-2.483.5 GHz operation
- 14 Channels selectable individually or domain-restricted
- DSSS Modulation
- Data Rate – 1000 kbps
- -91 dBm Typical sensitivity at 1 Mbps
- +10 dBm Typical output power with control
- Integrated low phase noise VCO, RF frequency synthesizer, PLL loop filter and PA
- Digital VCO and filter calibration

- Integrated RSSI ADC and I/Q DACs, RSSI readings available to host
- Balanced receiver and transmitter characteristics for low power consumption

MAC/Baseband Features:

- Hardware CSMA/CA access control, automatic ACK, and FCS creation and checking
- Automatic MAC packet retransmit
- Hardware Security Engine for AES and RC4-based ciphers
- Supports 802.1x, 802.1i security: WEP, WPA-PSK, and WPA-2-PSK.

Applications:

- Utility and Smart Energy
 - Thermostats
 - Smart Meters
 - White Goods
 - HVAC
- Consumer Electronics
 - Remote Control
 - Internet Radio
 - Home Security
 - Toys
- Industrial Controls
 - Chemical Sensors
 - HVAC
 - Security Systems
 - M2M Communication
- Remote Device Management
 - Location and Asset Tracking
 - Automotive
 - Code Update
- Retail
 - POS Terminals
 - Wireless Price Tags
 - Digital Remote
- Medical, Fitness, and Healthcare
 - Glucose Meters
 - Fitness Equipment
 - Patient Asset Tracking



MCP9700/9700A

MCP9701/9701A

Low-Power Linear Active Thermistor™ ICs

Features

- Tiny Analog Temperature Sensor
- Available Packages:
 - SC70-5, SOT-23-5, TO-92-3
- Wide Temperature Measurement Range:
 - -40°C to +125°C (Extended Temperature)
 - -40°C to +150°C (High Temperature)**(MCP9700/9700A)**
- Accuracy:
 - $\pm 2^\circ\text{C}$ (max.), 0°C to +70°C **(MCP9700A/9701A)**
 - $\pm 4^\circ\text{C}$ (max.), 0°C to +70°C **(MCP9700/9701)**
- Optimized for Analog-to-Digital Converters (ADCs):
 - 10.0 mV/°C (typical) **MCP9700/9700A**
 - 19.5 mV/°C (typical) **MCP9701/9701A**
- Wide Operating Voltage Range:
 - $V_{DD} = 2.3\text{V to } 5.5\text{V}$ **MCP9700/9700A**
 - $V_{DD} = 3.1\text{V to } 5.5\text{V}$ **MCP9701/9701A**
- Low Operating Current: 6 μA (typical)
- Optimized to Drive Large Capacitive Loads

Typical Applications

- Hard Disk Drives and Other PC Peripherals
- Entertainment Systems
- Home Appliance
- Office Equipment
- Battery Packs and Portable Equipment
- General Purpose Temperature Monitoring

Description

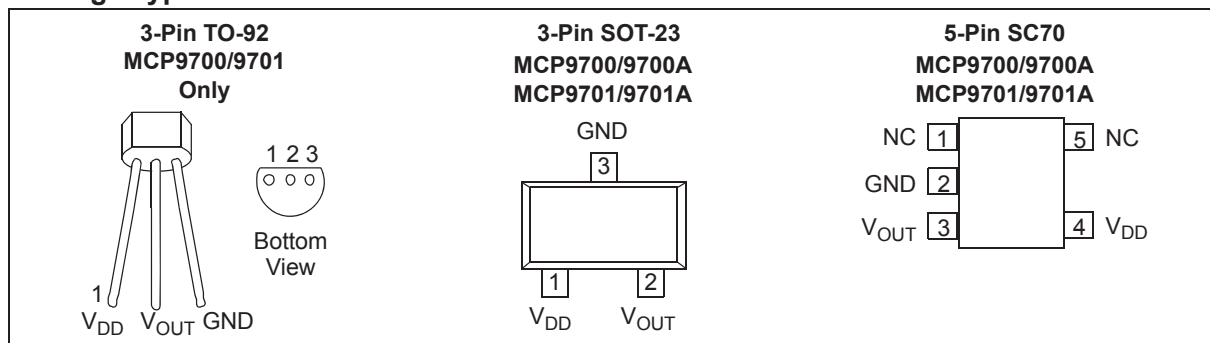
The MCP9700/9700A and MCP9701/9701A family of Linear Active Thermistor™ Intergrated Circuit (IC) is an analog temperature sensor that converts temperature to analog voltage. It's a low-cost, low-power sensor with an accuracy of $\pm 2^\circ\text{C}$ from 0°C to +70°C (MCP9700A/9701A) $\pm 4^\circ\text{C}$ from 0°C to +70°C (MCP9700/9701) while consuming 6 μA (typical) of operating current.

Unlike resistive sensors (such as thermistors), the Linear Active Thermistor IC does not require an additional signal-conditioning circuit. Therefore, the biasing circuit development overhead for thermistor solutions can be avoided by implementing this low-cost device. The voltage output pin (V_{OUT}) can be directly connected to the ADC input of a microcontroller. The MCP9700/9700A and MCP9701/9701A temperature coefficients are scaled to provide a 1°C/bit resolution for an 8-bit ADC with a reference voltage of 2.5V and 5V, respectively.

The MCP9700/9700A and MCP9701/9701A provide a low-cost solution for applications that require measurement of a relative change of temperature. When measuring relative change in temperature from +25°C, an accuracy of $\pm 1^\circ\text{C}$ (typical) can be realized from 0°C to +70°C. This accuracy can also be achieved by applying system calibration at +25°C.

In addition, this family is immune to the effects of parasitic capacitance and can drive large capacitive loads. This provides Printed Circuit Board (PCB) layout design flexibility by enabling the device to be remotely located from the microcontroller. Adding some capacitance at the output also helps the output transient response by reducing overshoots or undershoots. However, capacitive load is not required for sensor output stability.

Package Type



MCP9700/9700A and MCP9701/9701A

NOTES:

MCP9700/9700A and MCP9701/9701A

1.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Absolute Maximum Ratings †

V _{DD} :	6.0V
Storage temperature:	-65°C to +150°C
Ambient Temp. with Power Applied:	-40°C to +150°C
Output Current	±30 mA
Junction Temperature (T _J):	150°C
ESD Protection On All Pins (HBM:MM):(4 kV:200V)
Latch-Up Current at Each Pin:	±200 mA

†**Notice:** Stresses above those listed under “Maximum Ratings” may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and functional operation of the device at those or any other conditions above those indicated in the operational listings of this specification is not implied. Exposure to maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Electrical Specifications: Unless otherwise indicated:						
MCP9700/9700A: V _{DD} = 2.3V to 5.5V, GND = Ground, T _A = -40°C to +125°C and No load.						
MCP9701/9701A: V _{DD} = 3.1V to 5.5V, GND = Ground, T _A = -10°C to +125°C and No load.						
Parameter	Sym	Min	Typ	Max	Unit	Conditions
Power Supply						
Operating Voltage Range	V _{DD}	2.3	—	5.5	V	MCP9700/9700A
	V _{DD}	3.1	—	5.5	V	MCP9701/9701A
Operating Current	I _{DD}	—	6	12	µA	
Power Supply Rejection	Δ°C/ΔV _{DD}	—	0.1	—	°C/V	
Sensor Accuracy (Notes 1, 2)						
T _A = +25°C	T _{ACY}	—	±1	—	°C	
T _A = 0°C to +70°C	T _{ACY}	-2.0	±1	+2.0	°C	MCP9700A/9701A
T _A = -40°C to +125°C	T _{ACY}	-2.0	±1	+4.0	°C	MCP9700A
T _A = -10°C to +125°C	T _{ACY}	-2.0	±1	+4.0	°C	MCP9701A
T _A = 0°C to +70°C	T _{ACY}	-4.0	±2	+4.0	°C	MCP9700/9701
T _A = -40°C to +125°C	T _{ACY}	-4.0	±2	+6.0	°C	MCP9700
T _A = -10°C to +125°C	T _{ACY}	-4.0	±2	+6.0	°C	MCP9701
T _A = -40°C to +150°C	T _{ACY}	-4.0	±2	+6.0	°C	High Temperature, MCP9700 only
Sensor Output						
Output Voltage, T _A = 0°C	V _{0°C}	—	500	—	mV	MCP9700/9700A
Output Voltage, T _A = 0°C	V _{0°C}	—	400	—	mV	MCP9701/9701A
Temperature Coefficient	T _C	—	10.0	—	mV/°C	MCP9700/9700A
	T _C	—	19.5	—	mV/°C	MCP9701/9701A
Output Non-linearity	V _{ONL}	—	±0.5	—	°C	T _A = 0°C to +70°C (Note 2)
Output Current	I _{OUT}	—	—	100	µA	
Output Impedance	Z _{OUT}	—	20	—	Ω	I _{OUT} = 100 µA, f = 500 Hz
Output Load Regulation	ΔV _{OUT} /ΔI _{OUT}	—	1	—	Ω	T _A = 0°C to +70°C, I _{OUT} = 100 µA
Turn-on Time	t _{ON}	—	800	—	µs	

Note 1: The MCP9700/9700A family accuracy is tested with V_{DD} = 3.3V, while the MCP9701/9701A accuracy is tested with V_{DD} = 5.0V.

2: The MCP9700/9700A and MCP9701/9701A family is characterized using the first-order or linear equation, as shown in Equation 4-2. Also refer to Figure 2-16.

3: SC70-5 package thermal response with 1x1 inch, dual-sided copper clad, TO-92-3 package thermal response without PCB (leadless).

MPLAB® REAL ICE™ IN-CIRCUIT EMULATOR POWER MONITOR INSTRUCTION SHEET

The Power Monitor (AC244008) provides current and voltage monitoring of a target board or target device via the MPLAB REAL ICE In-Circuit Emulator.

The kit contains a Power Monitor board, a power supply, and this instruction sheet.

Monitor and Debug Features

- Monitor current (approximately 1uA-1A with selectable ranges) and voltage (1.25V-5.0V)
- Power the target (up to 1A)
- Graph current, voltage and time vs. code execution (PC)
- Additional features planned

Power Monitor Support

- The Power Monitor is supported on MPLAB X IDE 1.80 and above.
- The Power Monitor supports all Microchip devices.
- Only basic debugging features are available when using the Power Monitor: Run, Halt, and Single Step. No advanced features are available, e.g., Data Capture, Runtime Watches, Application In/Out, RTDM, Instrumented Trace.

Hardware Setup

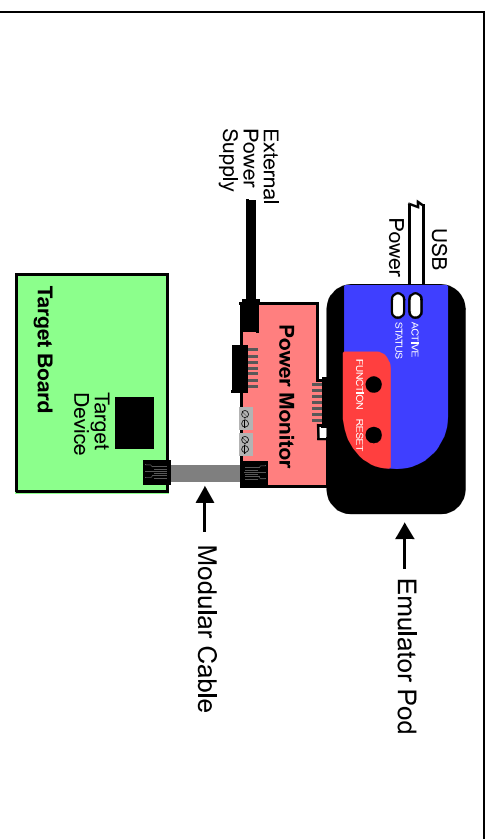
1. Power down the target board and disconnect the USB cable from the emulator.
2. Unplug a plugged-in driver board from the driver board slot and remove any logic probes in the logic probe connector.
3. Plug the Power Monitor board into the emulator driver board slot and logic probe connector simultaneously.
4. Reconnect the USB cable to the emulator.
5. Plug the three-pronged end of the Power Monitor power adapter into a power supply and then plug the single-pronged end into the Power Monitor board.
6. Connect to the target board via a modular cable. See the emulator user's guide (under "[Documentation](#)") for other connections or configurations.

The Microchip name and logo and the Microchip logo and MPLAB are registered trademarks and REAL ICE is a trademark of Microchip Technology Incorporated in the U.S.A. and other countries. © 2013 Microchip Technology Incorporated. All Rights Reserved. DS50002156A

Software Setup

1. Install the Power Monitor plugin. Select *Tools>Plugins*, click the **Available Plugins** tab, check "Power Monitor" and click **Install**. For more information on plugins, see MPLAB X IDE documentation.
2. Select *File>Project Properties*. Click the down arrow on the "Supported Plugin Board" drop-down box and select "Power Monitor Board".
3. Click the "Real ICE" category. Under the "Power" option, check "Power target circuit from REAL ICE", and specify the voltage under "Voltage Level".
4. Under the "Trace and Profiling" option category, select "Power Module (Target Power Sampling)" from "Data Collection Selection". Select "Power Data Only" from "Target Power Sampling Selection". See "[Documentation](#)" for other options. Click **OK** when complete.
5. Select *Tools>Embedded>Power Monitor* to open the Power Monitor window. View current and voltage values by time and PC.

FIGURE: POWER MONITOR BOARD CONNECTIONS



Documentation

This information will be incorporated into the "Emulator Accessories" chapter of the "MPLAB REAL ICE In-Circuit Emulator User's Guide for MPLAB X IDE" (DS52085). In the interim, see emulator topics in the MPLAB X IDE help file.

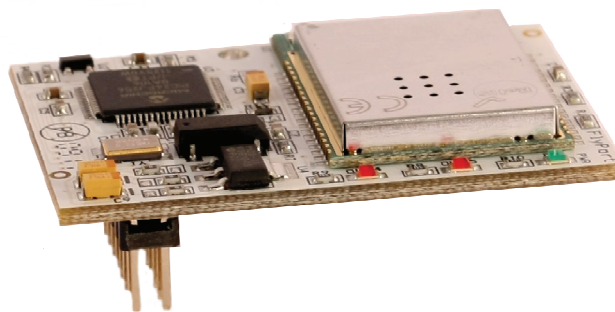
Introduction

Flyport Wi-Fi is a miniature **web server module** featuring a fully integrated 802.11 b/g/n Wi-Fi interface and several interfaces to the 'real world'.

The module integrates a powerful **16 bit processor** which runs custom applications and a **Wi-Fi certified transceiver** which handles the connectivity. A PCB antenna is on the module.

The module provides the embedded world with a powerful 'Internet engine' to a browser-based interface over Internet, in a small footprint, at low power and low cost. Real time data can be both displayed and/or updated from a standard web browser, even on smartphone or tablets, because Flyport supports dynamic web pages.

Flyport WiFi is powered by openPICUS, open source framework and serial bootloader. The free openPICUS IDE allows to create applications, to import web pages and to compile and download code to the module.



Facts

16 Bit Processor	PIC24FJ256, 256K Flash, 16K Ram, 16Mips@32Mhz
Transceiver	802.11 b/g/n Wi-Fi certified MRF24WB0MB
Power Supply	5V or 3,3V, integrated LDO
Integrated RTC	32,768 Khz quartz onboard
Digital I/O	up to 18, remappable at Runtime
Analog In	up to 4, 10bits ADC, Vref=2,048V
Communication	up to 4 UARTs, SPI, I2C
Connector	26 ways, 2 rows, standard 2.54mm male pin header
Dimensions	35 x 48 x 15 mm, 11 grams

Benefits

- Easy to setup
- Easy to manage and use
- Low power
- Zero Time for development
- Open source

Applications

- Wi-Fi sensors
- Wi-Fi automation
- Internet of Things
- Wi-Fi audio/music
- Home remote control
- Industrial/process management

- 802.11 b/g/n WIFI
- Microchip PIC 24F 16 bit processor
- Microchip Wi-Fi Module MRF24WB0MA/RM Pcb Antenna or uFL
- openPICUS Free IDE
- Serial Bootloader
- Webserver
TCP Socket
UDP Socket
SNTP
SMTP
- 3,3/5V power supply
- RTCC onboard
- **Remappable** pins at runtime
- Digital I/O
- Analog Inputs
- Up to 4 UARTs
- SPI
- I2C
- 35*48*15mm (11 gr)

Introduction

FLYPORT Wi-Fi is powered by openPICUS technology. FLYPORT Wi-Fi has a powerful 256K Flash 16bit processor from Microchip that runs the Wireless Stack and the application layer. This means that you have full control of the connectivity (extremely important for energy saving) and the application (for ex. the PIC micro controller onboard can process data coming from an analog sensor and display these data on the integrated webserver, or send by email or save to a remote FTP server).

Available pins:

SPI, I2C, UART and embedded Real Time clock.

I/O : analog and digital and PWM.

Programming:

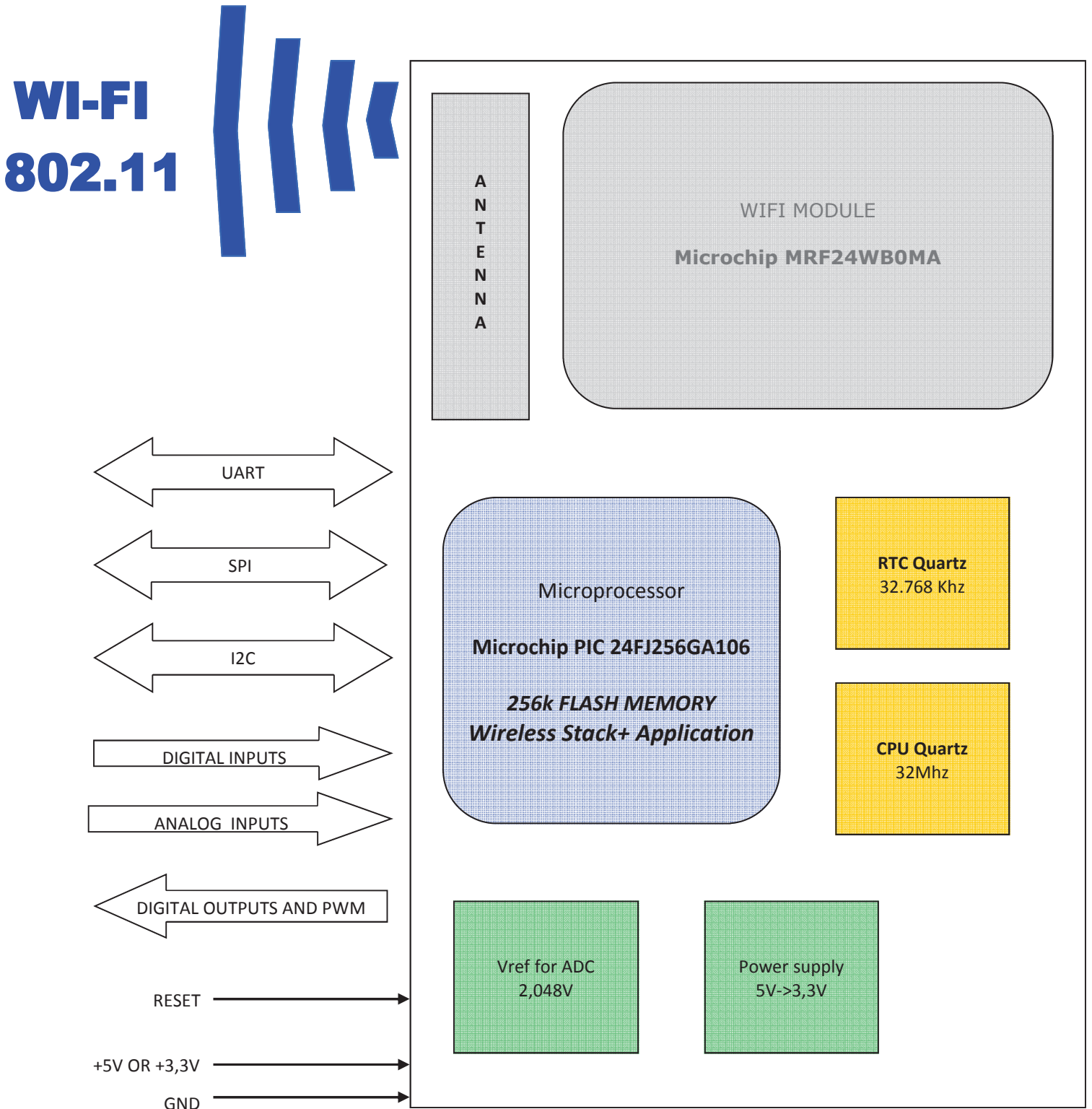
C/C++ skills are needed. No expansive programmer is needed since a serial bootloader on module allows you to download the firmware using just a serial cable.

On www.openpicus.com you can find examples, libraries and tools to start to develop immediately.

Technical Informations

Electrical		802.11 WIFI	
Power supply	5V or 3.3V	Compatibility	b/g/n networks
Current consumption (External 3.3V supply)	Wi-Fi connected 127.5mA	LDO current 80uA (in case of use)	Output power 10dBm
And LDO not used)	HIBERNATION (transceiver OFF) 38.5mA	LED current (7mA each)	Sensitivity -91dBm
	SLEEP (micro and transceiver OFF) 11uA (without LED and LDO)		Max Data Rate 2 Mbit
Mechanical		Certifications	
Operating Temperature	-20..+85°C	Radio regulation certification for United States (FCC), Canada (IC), Europe (ETSI) and Japan (ARIB)	
Dimensions	35*48*15mm	Wi-Fi® certified (WFA ID: WFA7150)	

Block diagram



powered by open **Picus** technology

Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager

FEATURES

- Operates from Inputs of 20mV
- Complete Energy Harvesting Power Management System
 - Selectable V_{OUT} of 2.35V, 3.3V, 4.1V or 5V
 - LDO: 2.2V at 3mA
 - Logic Controlled Output
 - Reserve Energy Output
- Power Good Indicator
- Uses Compact Step-Up Transformers
- Small 12-Lead (3mm × 4mm) DFN or 16-Lead SSOP Packages

APPLICATIONS

- Remote Sensors and Radio Power
- Surplus Heat Energy Harvesting
- HVAC Systems
- Industrial Wireless Sensing
- Automatic Metering
- Building Automation
- Predictive Maintenance

LT, LT, LTC, LTM, Linear Technology and the Linear logo are registered trademarks of Linear Technology Corporation. All other trademarks are the property of their respective owners.

DESCRIPTION

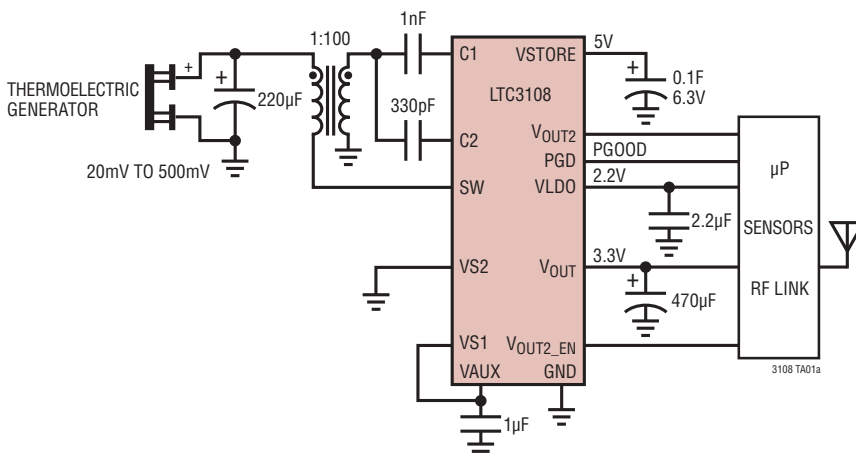
The **LTC[®]3108** is a highly integrated DC/DC converter ideal for harvesting and managing surplus energy from extremely low input voltage sources such as TEGs (thermoelectric generators), thermopiles and small solar cells. The step-up topology operates from input voltages as low as 20mV. The LTC3108 is functionally equivalent to the LTC3108-1 except for its unique fixed V_{OUT} options.

Using a small step-up transformer, the LTC3108 provides a complete power management solution for wireless sensing and data acquisition. The 2.2V LDO powers an external microprocessor, while the main output is programmed to one of four fixed voltages to power a wireless transmitter or sensors. The power good indicator signals that the main output voltage is within regulation. A storage capacitor provides power when the input voltage source is unavailable. Extremely low quiescent current and high efficiency design ensure the fastest possible charge times of the output reservoir capacitor.

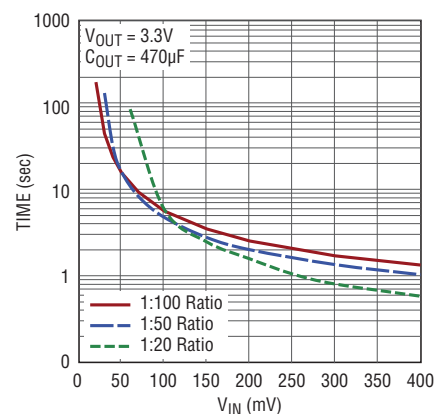
The LTC3108 is available in a small, thermally enhanced 12-lead (3mm × 4mm) DFN package and a 16-lead SSOP package.

TYPICAL APPLICATION

Wireless Remote Sensor Application Powered From a Peltier Cell



V_{OUT} Charge Time



3108 TA01b

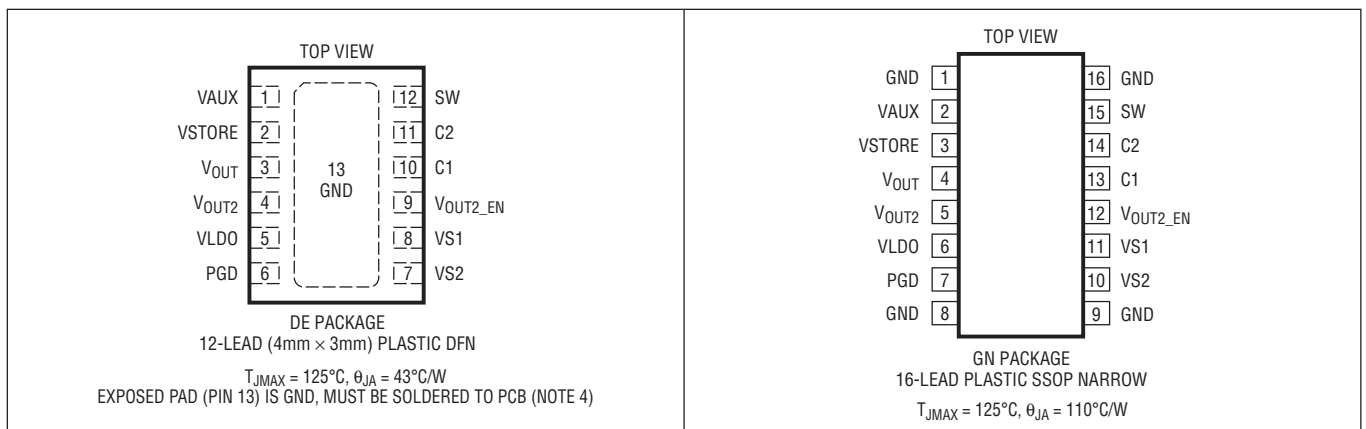
3108fc

LTC3108

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Note 1)

SW Voltage	-0.3V to 2V	VS1, VS2, VAUX, V _{OUT} , PGD	-0.3V to 6V
C1 Voltage.....	-0.3V to 6V	VLDO, VSTORE	-0.3V to 6V
C2 Voltage (Note 5).....	-8V to 8V	Operating Junction Temperature Range	
V _{OUT2} , V _{OUT2_EN}	-0.3V to 6V	(Note 2).....	-40°C to 125°C
VAUX.....	15mA into VAUX	Storage Temperature Range.....	-65°C to 125°C

PIN CONFIGURATION



ORDER INFORMATION

LEAD FREE FINISH	TAPE AND REEL	PART MARKING*	PACKAGE DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE
LTC3108EDE#PBF	LTC3108EDE#TRPBF	3108	12-Lead (4mm × 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3108IDE#PBF	LTC3108IDE#TRPBF	3108	12-Lead (4mm × 3mm) Plastic DFN	-40°C to 125°C
LTC3108EGN#PBF	LTC3108EGN#TRPBF	3108	16-Lead Plastic SSOP	-40°C to 125°C
LTC3108IGN#PBF	LTC3108IGN#TRPBF	3108	16-Lead Plastic SSOP	-40°C to 125°C

Consult LTC Marketing for parts specified for other fixed output voltages or wider operating temperature ranges.

*The temperature grade is identified by a label on the shipping container.

For more information on lead free part marking, go to: <http://www.linear.com/leadfree/>

For more information on tape and reel specifications, go to: <http://www.linear.com/tapeandreeel/>

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for $T_A = 25^{\circ}\text{C}$ (Note 2). VAUX = 5V, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Minimum Start-Up Voltage	Using 1:100 Transformer Turns Ratio, VAUX = 0V		20	50	mV
No-Load Input Current	Using 1:100 Transformer Turns Ratio; V _{IN} = 20mV, V _{OUT2_EN} = 0V; All Outputs Charged and in Regulation		3		mA
Input Voltage Range	Using 1:100 Transformer Turns Ratio	● V _{STARTUP}		500	mV

3108fc

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

The ● denotes the specifications which apply over the full operating junction temperature range, otherwise specifications are for $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 2). $VAUX = 5\text{V}$, unless otherwise noted.

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Output Voltage	VS1 = VS2 = GND	●	2.30	2.350	2.40	V
	VS1 = VAUX, VS2 = GND	●	3.234	3.300	3.366	V
	VS1 = GND, VS2 = VAUX	●	4.018	4.100	4.182	V
	VS1 = VS2 = VAUX	●	4.90	5.000	5.10	V
V_{OUT} Quiescent Current	$V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $V_{OUT2_EN} = 0\text{V}$			0.2		μA
VAUX Quiescent Current	No Load, All Outputs Charged			6	9	μA
LDO Output Voltage	0.5mA Load	●	2.134	2.2	2.266	V
LDO Load Regulation	For 0mA to 2mA Load			0.5	1	%
LDO Line Regulation	For VAUX from 2.5V to 5V			0.05	0.2	%
LDO Dropout Voltage	$I_{LDO} = 2\text{mA}$	●		100	200	mV
LDO Current Limit	$V_{LDO} = 0\text{V}$	●	4	11		mA
V_{OUT} Current Limit	$V_{OUT} = 0\text{V}$	●	2.8	4.5	7	mA
VSTORE Current Limit	VSTORE = 0V	●	2.8	4.5	7	mA
VAUX Clamp Voltage	Current into VAUX = 5mA	●	5	5.25	5.55	V
VSTORE Leakage Current	VSTORE = 5V			0.1	0.3	μA
V_{OUT2} Leakage Current	$V_{OUT2} = 0\text{V}$, $V_{OUT2_EN} = 0\text{V}$			0.1		μA
VS1, VS2 Threshold Voltage		●	0.4	0.85	1.2	V
VS1, VS2 Input Current	VS1 = VS2 = 5V			0.01	0.1	μA
PGOOD Threshold (Rising)	Measured Relative to the V_{OUT} Voltage			-7.5		%
PGOOD Threshold (Falling)	Measured Relative to the V_{OUT} Voltage			-9		%
PGOOD V_{OL}	Sink Current = 100 μA			0.15	0.3	V
PGOOD V_{OH}	Source Current = 0		2.1	2.2	2.3	V
PGOOD Pull-Up Resistance				1		$\text{M}\Omega$
V_{OUT2_EN} Threshold Voltage	V_{OUT2_EN} Rising	●	0.4	1	1.3	V
V_{OUT2_EN} Pull-Down Resistance				5		$\text{M}\Omega$
V_{OUT2} Turn-On Time				5		μs
V_{OUT2} Turn-Off Time	(Note 3)			0.15		μs
V_{OUT2} Current Limit	$V_{OUT} = 3.3\text{V}$	●	0.15	0.3	0.45	A
V_{OUT2} Current Limit Response Time	(Note 3)			350		ns
V_{OUT2} P-Channel MOSFET On-Resistance	$V_{OUT} = 3.3\text{V}$ (Note 3)			1.3		Ω
N-Channel MOSFET On-Resistance	C2 = 5V (Note 3)			0.5		Ω

Note 1: Stresses beyond those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. Exposure to any Absolute Maximum Rating condition for extended periods may affect device reliability and lifetime.

Note 2: The LTC3108 is tested under pulsed load conditions such that $T_J \approx T_A$. The LTC3108E is guaranteed to meet specifications from 0°C to 85°C junction temperature. Specifications over the -40°C to 125°C operating junction temperature range are assured by design, characterization and correlation with statistical process controls. The LTC3108I is guaranteed over the full -40°C to 125°C operating junction temperature range. Note that the maximum ambient temperature is determined by specific operating conditions in conjunction with board layout, the rated thermal package thermal resistance and other environmental factors. The junction

temperature (T_J) is calculated from the ambient temperature (T_A) and power dissipation (P_D) according to the formula: $T_J = T_A + (P_D \cdot \theta_{JA}^\circ\text{C/W})$, where θ_{JA} is the package thermal impedance.

Note 3: Specification is guaranteed by design and not 100% tested in production.

Note 4: Failure to solder the exposed backside of the package to the PC board ground plane will result in a thermal resistance much higher than 43°C/W .

Note 5: The absolute maximum rating is a DC rating. Under certain conditions in the applications shown, the peak AC voltage on the C2 pin may exceed $\pm 8\text{V}$. This behavior is normal and acceptable because the current into the pin is limited by the impedance of the coupling capacitor.

3108fc

Thermo Electric Generation Module

MFG Part Number : GM200-127-14-10

A thermoelectric power generating (TEG) module is one kind of power generating device which uses the Seebeck Effect in order to convert heat into electricity directly.

Characteristics:

- Compact structure (no moving parts)
- Reliable performance
- Maintenance-free
- Noise-free operation
- Low-carbon as it is a "green" technology

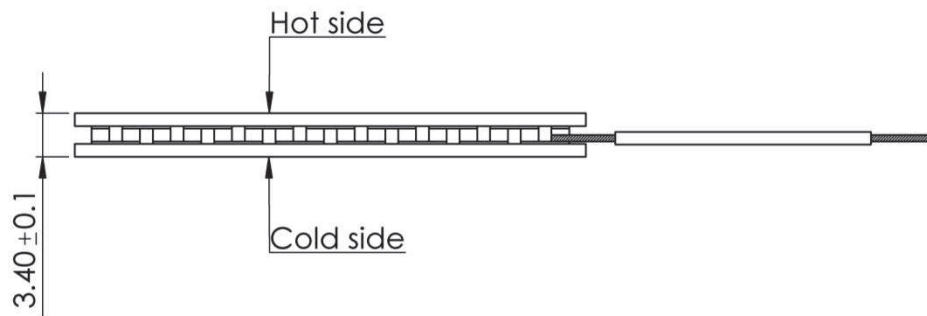
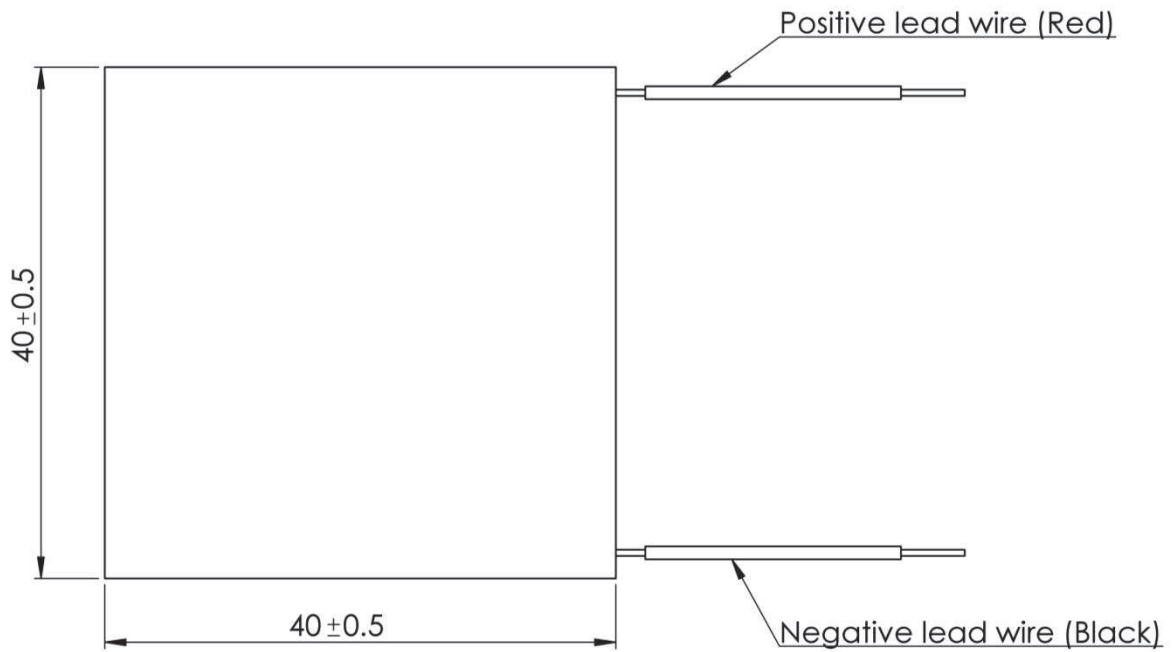
The selection of the heat source of the TEG is extensive. It is capable of generating DC electricity continuously as long as there is a temperature difference applied at the two sides of the module. Except for the thermoelectric material, another important factor which affects the generating capacity and the conversion efficiency of the TEG module is the temperature difference. Increasing the temperature difference between the two sides of the module (the hot side and the cold side), increases both the generating capacity and hence the conversion efficiency of the module.

Performance Parameters

Parameters for Hot Side Temp 200°C and Cold Side 30°C	
Matched Load Output Power	6.7W
Matched Load Resistance	2.28Ω ± 15%
Open Circuit Voltage	7.81V
Matched Load Output Current	1.72A
Matched Load Output Voltage	3.91V
Heat Flow Through Module	~134W
Maximum. Compress. (non destructive)	1MPa
Max Operation Temperature	Hot side : 200°C Cold side: 175°C

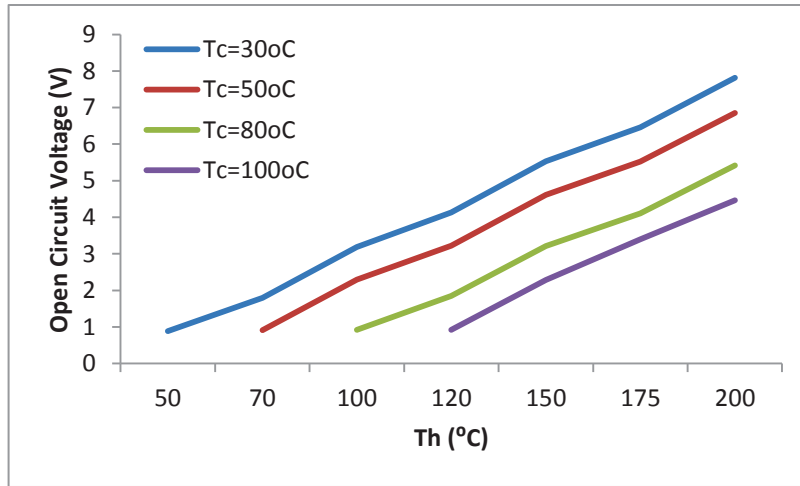


Dimensions: *Drawing



Performance Graphs:

Graph indicating Open circuit voltage v. Hot side temperature with various fixed cold sides



Matched Load Output Power v. Hot side temperature for various fixed cold sides

