



Redes de Sensores Inalámbricos Autoalimentados

-Energy Harvesting-

Francisco Damián Iglesias

Tutor

MSc. Ing. Ricardo Vecchio

Trabajo Final

Ingeniería en Electrónica y Comunicaciones

Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería
Pontificia Universidad Católica Argentina

20 de Diciembre de 2011

Agradecimientos

Al tutor de tesis, Ing. Ricardo Vecchio, quién con su persistencia, ganas y conocimientos hizo posible el haber llegado a este momento tan importante.

Al coordinador de Trabajo Final, Ing. Norberto Heyaca, quién delineó la manera de encarar este trabajo y fue clave para arrancar con esta última etapa.

A mi amigo y colega, Leandro Vacirca, con quién compartí estudios durante mucho tiempo y estamos juntos una vez más para el trabajo final.

Y a mi familia, claro, a mis padres quienes hicieron posible esta carrera y me brindaron todo su apoyo durante toda mi formación académica y a mis hermanas, abuela y madrina por estar siempre presentes.

Índice

Agradecimientos	2
Redes de sensores	5
Generalidades	5
Redes de sensores ubicuas	6
Sensores inalámbricos “zero-power”	7
Sensores	8
Transductores de captación de energía	9
Módulo de potencia	11
Procesador y enlace de radio inalámbrico	12
Punto de acceso central inalámbrico	13
Protocolos inalámbricos concientes de la energía	14
Baterías de estado sólido	15
Teoría	15
CI’s EnerChip de Cymbet	17
Celdas de micro-energía (MEC) de Infinite Power Solutions	18
Estudio del consumo durante una transmisión	19
Energy Harvesters	26
Cosechadores de energía	26
CBC-EVAL-11 Inductive Charger	27
Información general	27
Descripción del sistema	27
TI eZ430-RF2500-SEH	31
Descripción funcional	31
PMG FSH	33
Aprovechamiento de la energía de vibración	33
Construcción y funcionamiento interno de un VEH electromagnético	33
Fuente de vibración	34
Ancho de banda: Ventana de operación máxima	34
Características del PMG FSH:	35
TE-Power NODE	36
Termo-energía	36
Potencia de salida	37
El WSM en el TE-Power NODE	37
Conclusión	39
Bibliografía	40

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 - Diagrama de un sensor inalámbrico "zero-power"	8
Ilustración 2 - Baterías de película fina y estado sólido	12
Ilustración 3 - eZ430-RF2500T wireless target board (end device).....	13
Ilustración 4 - eZ430-RF2500 Access point.....	13
Ilustración 5 - Comparación de una batería convencional y una de estado sólido.....	15
Ilustración 6 - Vista esquemática de una batería de estado sólido de ión plata.....	16
Ilustración 7 - Diagrama funcional de un EnerChip CC	17
Ilustración 8 - Vista de un EnerChip CC CBC3150	17
Ilustración 9 - Vista de una celda THINERGY MEC202	18
Ilustración 10 - Set-up de medición sobre el end device eZ430-RF2500	19
Ilustración 11 - Perfil de corriente del end device (cinco segundos).....	20
Ilustración 12 - Perfil de corriente del end device durante la transmisión	20
Ilustración 13 - Años de operación vs. intervalo de transmisión.....	25
Ilustración 14 - CBC-EVAL-11 Evaluation Kit.....	27
Ilustración 15 - Diagrama en bloques de la placa receptora.....	28
Ilustración 16 - Esquemático de la placa receptora	29
Ilustración 17 - Diagrama en bloques de la placa transmisora	29
Ilustración 18 - Esquemático de la placa transmisora	30
Ilustración 19 - eZ430-RF2500-SEH	31
Ilustración 20 - Diagrama en bloques.....	32
Ilustración 21 - Diseño esquemático	32
Ilustración 22 - Espectro de potencia de salida	35
Ilustración 23 - Vista de un VEH PMG FSH	35
Ilustración 24 - Vista de un TE-Power NODE	36
Ilustración 25 - Un TE-qNODE adherido a una línea de alta corriente	37

Índice de tablas

Tabla 1 - Potencia entregada para los distintos "cosechadores".....	10
Tabla 2 - Comparación de los distintos tipos de baterías utilizadas en EH.....	18
Tabla 3 - Contribuciones significantes de corriente y tiempo	21
Tabla 4 - Consumo de corriente previsto.....	23
Tabla 5 - Comparación contra baterías convencionales	36
Tabla 6 - Características termo-eléctricas típicas del TEG	38

Redes de sensores

Generalidades

Las redes de sensores están extendiendo sus usos en las fábricas, complejos industriales, edificios comerciales y residenciales, zonas agrícolas y áreas urbanas, sirviendo para mejorar la eficiencia en la fabricación, la fiabilidad, la automatización y la seguridad. Estas redes realizan una variedad de funciones útiles, incluyendo la automatización de las fábricas, medición y control, control de iluminación, calefacción y refrigeración en los edificios residenciales y comerciales, el monitoreo de la salud estructural de puentes, edificios comerciales, aeronaves y maquinarias, sistemas de monitoreo de presión de neumáticos (TPMS), la medición del nivel en tanques, y el seguimiento de pacientes en hospitales y hogares de ancianos.

Hasta la fecha, casi todas las redes de sensores utilizan conexiones cableadas para la comunicación de datos y la alimentación. El costo de instalar una red de sensores con cable de cobre, conductos, junto con la infraestructura de apoyo se ha vuelto extremadamente costoso. Hay nuevas soluciones emergentes utilizando diversos protocolos inalámbricos como Wi-Fi 802.11 a/b/g/n, o ZigBee para conectar los dispositivos sensores a la red y eliminar el cableado de comunicaciones de datos. Sin embargo, los sensores inalámbricos todavía necesitan ser alimentados. El uso de baterías como las pilas AA ha sido utilizado como una solución, pero estas pilas se agotan y cambiarlas a menudo es una propuesta costosa. Una investigación de OnWorld ha calculado que estos cambios de pila tendrán un costo que se acercará a los US\$ 1.000 millones en 2013. Lo que se necesita es una solución que “coseche” la energía del ambiente en torno al dispositivo del sensor inalámbrico.

Redes de sensores ubicuas

Redes de sensores ubicuas (USN's) es el término que se utiliza para las redes de sensores inalámbricos y de control que utilizan baterías o técnicas de captación de energía para alimentar el dispositivo y que podrían extenderse por toda la superficie, haciéndolas omnipresentes. Con la disponibilidad de circuitos integrados de bajo costo para realizar el sensado, procesamiento de señales, la comunicación y las funciones de recopilación de datos, junto con la versatilidad que las redes inalámbricas proveen, podemos alejarnos de las instalaciones fijas y las redes cableadas, tanto en nuevas construcciones, así como en la reconversión de instalaciones existentes.

Sensores inalámbricos “zero-power”

Un inconveniente al avanzar hacia la instalación de una red inalámbrica ha sido la escasa fiabilidad y vida útil limitada de las baterías necesarias para suministrar la energía al sensor, radio, procesador y otros componentes electrónicos del sistema. Esta limitación ha reducido en cierta medida la proliferación de las redes inalámbricas. Las baterías pueden ser eliminadas mediante el uso de técnicas de cosecha de energía que utilizan un transductor de conversión de energía vinculado a un sistema integrado recargable de almacenamiento de energía. Esta pequeña "central eléctrica" dura tanto como la vida útil de los sensores inalámbricos.

Un Sensor inalámbrico de potencia cero, como se muestra en la siguiente ilustración, por lo general se compone de cinco elementos básicos:

1. El **sensor** en si mismo, para detectar y cuantificar cualquier número de parámetros ambientales tales como movimiento, proximidad, temperatura, presión, pH, luz, tensión, vibración, y muchos otros.
2. Un **transductor de captación de energía** que convierta algún tipo de energía del ambiente en electricidad.
3. Un **módulo de potencia** para recoger, almacenar y distribuir la energía eléctrica a los dispositivos electrónicos o electromecánicos residentes en el nodo sensor.
4. Un **microcontrolador** o variante del mismo para recibir la señal desde el sensor, convertirla en una forma útil para su análisis, y comunicarse con el enlace de radio.
5. Un **enlace de radio** en el nodo sensor para transmitir la información del procesador, de manera continua, periódica, o por eventos a un receptor de datos.

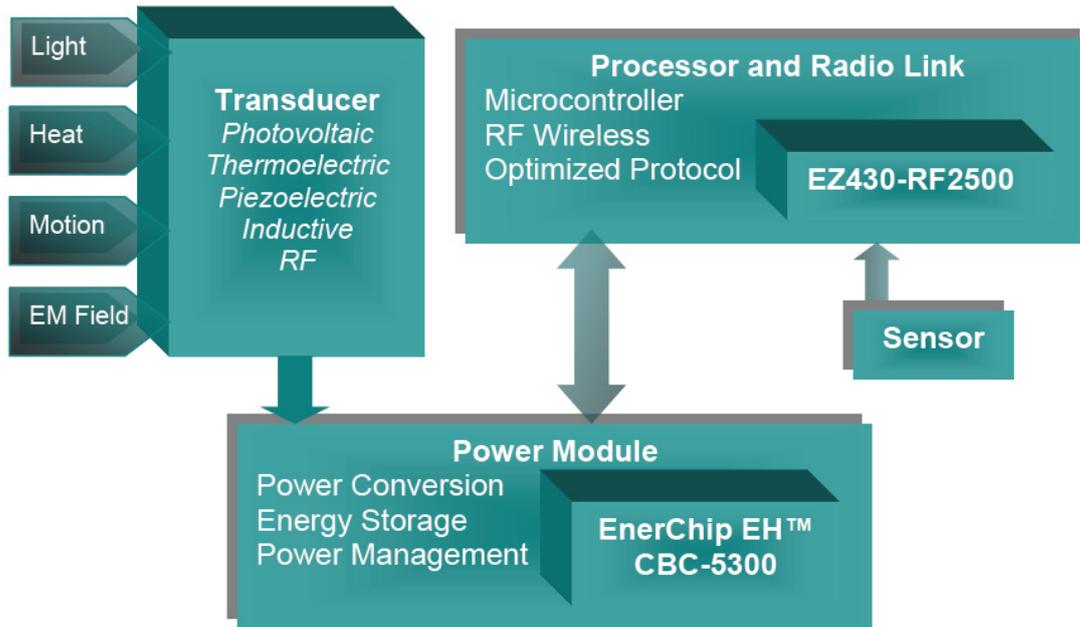


Ilustración 1- Diagrama de un sensor inalámbrico "zero-power"

Sensores

Sensores de todo tipo pueden ser implementados en redes inalámbricas, ya sea para mejorar la calidad de vida en el caso de sensores de presencia en instalaciones de asistencia de vida, sensores de nivel de luz para reducir el consumo energético en un edificio comercial, un sensor de proximidad para maximizar el flujo de productos en una línea de fabricación, o un sensor de fluidos para controlar la cantidad de líquido en un tanque de aceite. Estos son sólo algunos ejemplos de las miles de aplicaciones en las que las redes de sensores inalámbricos se están utilizando hoy en día. La respuesta a la entrada de información puede ser inmediata o retardada y puede tomar muchas formas. Las reacciones y respuestas son específicas para el medio ambiente en el que se utiliza la red. Por ejemplo, podría ser necesario enviar una señal a un actuador para abrir o cerrar una válvula en base a la lectura de un sensor de presión o de temperatura.

Transductores de captación de energía

Las fuentes de alimentación para sensores inalámbricos han sido tradicionalmente baterías primarias (es decir, no recargables) como las pilas alcalinas AA o AAA, de cloruro de tionilo de litio, pilas de litio tipo moneda, o un contenedor de otros químicos. Cada tipo de batería tiene especificaciones únicas según la química y la construcción de la célula. Algunos químicos tienen buen desempeño a altas temperaturas, y algunos ofrecen una alta densidad energética, mientras que otros están diseñados para largos periodos de consumo constante. Independientemente del diseño de la célula, la construcción, y la química, todas las baterías tienen limitaciones inherentes con respecto a su vida útil, capacidad de entregar pulsos de corriente elevados, y así sucesivamente. Por otra parte, por su propia naturaleza, las pilas primarias no son recargables, por lo que eventualmente se agotará su carga.

Mientras que los diseñadores hacen todo lo posible para reducir al mínimo el consumo de energía periódico y en reposo, así como también reducir el ciclo de trabajo del transmisor tanto como las limitaciones de la red lo permitan, las baterías tradicionales tienen una capacidad de carga limitada y con el tiempo se agotan debido al consumo de energía de la carga (además de la auto-descarga de la propia célula). En función del entorno operativo y las condiciones, la batería en utilización para suministrar energía a un nodo sensor inalámbrico puede tener una vida útil de entre unos pocos meses hasta varios años. Además de los gastos de reemplazo de la batería, la fiabilidad del sistema está siempre en juego y es algo que el administrador del sistema debe tener en cuenta. Las implicaciones de un nodo inalámbrico que falla sin previo aviso varían de acuerdo a la función que el nodo está cumpliendo.

Pero hay otra forma de proporcionar la fuente de alimentación, la cosecha de la energía del ambiente que rodea al dispositivo sensor. La cosecha de la energía proporciona la potencia y la energía necesaria para operar el nodo sensor y, además, no requiere mantenimiento de la batería durante la vida operativa del nodo sensor. En efecto, el aprovechamiento de la energía permite sensores perpetuos.

Los transductores de aprovechamiento de la energía son una fuente de poder que es regular o permanentemente disponible. Esta fuente de energía podría venir en forma de un diferencial de temperatura, una fuente de vibración, como un motor de corriente alterna, una onda electromagnética irradiada o propagada, o una fuente de luz, por ejemplo. Cualquiera de estas fuentes de energía puede ser convertida en energía eléctrica útil utilizando transductores diseñados para convertir una de estas formas de poder a energía eléctrica.

Los siguientes transductores son los más comunes:

- Fotovoltaico: también conocido como de energía solar - convierte la luz en energía eléctrica
- Electrostático o electromagnético - convierte las vibraciones
- Termoeléctrico: convierte una diferencia de temperatura en energía eléctrica
- Piezoeléctricos: convierte el movimiento mecánico en energía eléctrica
- RF e inductivo: convierte la energía magnética en energía eléctrica

Fuente de energía	Desafío en el diseño	Potencia estimada (en 1 cm ³ o 1 cm ²)
Luz	Conformarlo en un área pequeña, amplio rango de voltaje de entrada	10 μW-15 mW (aire libre: 0,15 mW - 15 mW) (bajo techo: <10 μW)
Vibraciones	Variabilidad de vibración	1 μW - 200 μW (electrostático: 50 - 100 μW) (electromagnético: <1 μW)
Térmica	Pequeños gradientes térmicos	15 μW (gradiente 10 °C)
Piezoeléctrica	Capturar presión o movimiento	~ 200 μW
RF e inductiva	Acoplamiento y rectificación	variado

Tabla 1 - Potencia entregada para los distintos "cosechadores"

La eficiencia y la potencia de salida de cada transductor varían de acuerdo al diseño del mismo, el material de construcción, la temperatura de funcionamiento, así como la potencia de entrada disponible y la adaptación de impedancia en la salida del transductor.

Módulo de potencia

Los sensores inalámbricos de potencia cero requieren de un módulo de alimentación para acondicionar la salida del transductor de energía, almacenar y entregar la energía al resto del sensor inalámbrico. En la mayoría de los entornos, no puede esperarse que los transductores que producen energía entreguen potencia a la carga de manera continua bajo cualquier circunstancia. Mientras que cada transductor ofrece una potencia de cierta amplitud y con cierta regularidad, estos no almacenan la energía. En consecuencia, cuando esa fuente de poder no está presente, no habrá energía para alimentar la carga en la ausencia de un dispositivo de almacenamiento de energía. Por otra parte, los transductores no suelen entregar la energía a la tensión adecuada para operar el sistema electrónico, por lo tanto, el acondicionamiento de la potencia del transductor es esencial para que esta sea útil en el funcionamiento del sensor, el procesador y el transmisor. En particular, sin un dispositivo de almacenamiento de energía, sería difícil o imposible entregar el pulso de corriente necesaria para impulsar el transmisor inalámbrico.

Los dispositivos tradicionales de almacenamiento de energía recargables, como súper capacitores y baterías de celda tipo moneda tienen graves limitaciones con respecto a los ciclos de carga/descarga, auto-descarga, y los requisitos de corriente y tensión de carga.

Un nuevo dispositivo de almacenamiento de energía está ahora disponible, el mismo satisface las necesidades de la recolección de energía. El EnerChip de Cymbet es una batería de estado sólido de película delgada con una gran ciclo de vida de carga/descarga, baja auto-descarga, recarga rápida y sencilla controlada por tensión. Estas características lo convierten en una celda de almacenamiento de energía ideal para los nodos de sensores inalámbricos que utilizan la recolección de energía, lo que permite sensado perpetuo.

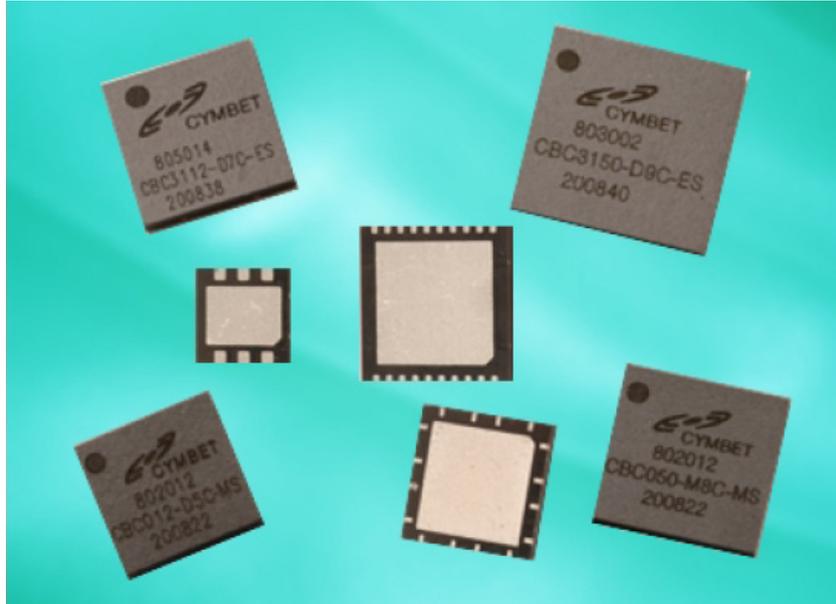


Ilustración 2 - Baterías de película fina y estado sólido

Procesador y enlace de radio inalámbrico

La salida del sensor suele estar conectada a un microcontrolador que procesa la señal creada a partir de la medición de los parámetros de interés (por ejemplo, temperatura, presión, aceleración, etc.) y la convierte de forma que sea útil para la transmisión de datos, recolección y análisis. Es importante que el microcontrolador y el radio operen en modo de bajo consumo siempre que sea posible con el fin de maximizar la vida útil de la fuente de alimentación. Dependiendo de la corriente de reposo de la radio y el microcontrolador, la potencia del transmisor y el ciclo de trabajo y la complejidad y la duración de cualquier proceso de señal requerido, el consumo de la fuente de alimentación puede estar determinado por el estado estacionario o el consumo de energía en estado activo. El consumo de energía también se puede reducir a través de algoritmos del firmware del microcontrolador que administren eficazmente la potencia, las conversiones de analógico a digital, y las interrupciones por eventos.

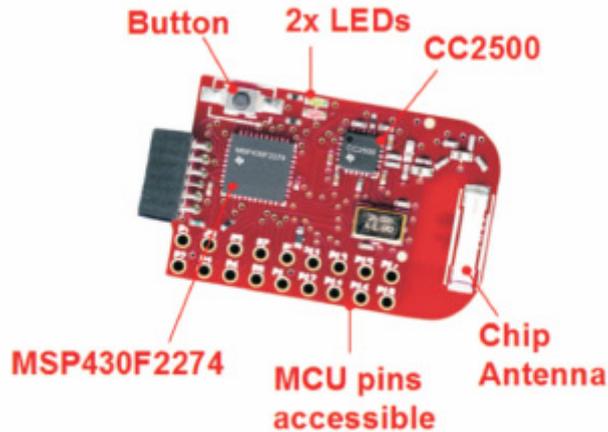


Ilustración 3 - eZ430-RF2500T wireless target board (end device)

Punto de acceso central inalámbrico

Los sensores inalámbricos de potencia cero se comunicarán con un punto de acceso inalámbrico/hub para recibir información de cualquier número de nodos de sensores remotos inalámbricos, agregar datos y para la conexión a la red de la empresa. El punto de acceso - también conocido como host inalámbrico - es una unidad centralizada que se comunica con, y recopila información de los nodos remotos. Por lo general se conecta directamente a una computadora, otro sistema de monitoreo o a una red de área local donde los datos se organizan, se almacenan para su posterior análisis, se utilizan para proporcionar actualizaciones en tiempo real y para activar mecanismos de respuesta.



Ilustración 4 - eZ430-RF2500 Access point

Protocolos inalámbricos concientes de la energía

SimpliciTI es un protocolo de red de radio frecuencia (RF) simple y de bajo consumo de energía destinado a pequeñas redes de RF. Este tipo de redes suelen contener dispositivos operados por batería que requieren una larga vida de la misma, baja velocidad de datos y corto ciclo de trabajo (programable) y tienen un número limitado de nodos hablando directamente entre sí o a través de un punto de acceso o repetidores. Los puntos de acceso y los repetidores no son obligatorios, pero proporcionan una funcionalidad adicional, como almacenar y reenviar mensajes. Con Simpliciti las necesidades de recursos del microcontrolador (MCU) son mínimas lo que se traduce en un bajo costo del sistema. El protocolo de red Simpliciti soporta una amplia gama de aplicaciones de baja potencia incluyendo dispositivos de alarma y seguridad (detectores de humo, detectores de rotura de cristales, sensores de monóxido de carbono, y sensores de luz), lectura automática de medidores (contadores de gas y medidores de agua), la automatización del hogar (electrodomésticos, apertura del garaje, y los dispositivos de medio ambiente), y RFID activo.

Baterías de estado sólido

Teoría

En los sólidos iónicos, una batería de estado sólido es una batería que tiene ambos electrodos sólidos y electrolitos sólidos. Como grupo, estos materiales son muy buenos conductores de iones, pero son esencialmente aisladores para los electrones, propiedades que son prerequisites para cualquier electrolito. La alta conductividad iónica reduce al mínimo la resistencia interna de la batería, lo que permite una alta densidad de energía, mientras que la alta resistencia a los electrones minimiza su tasa de auto descarga, aumentando así su vida útil.

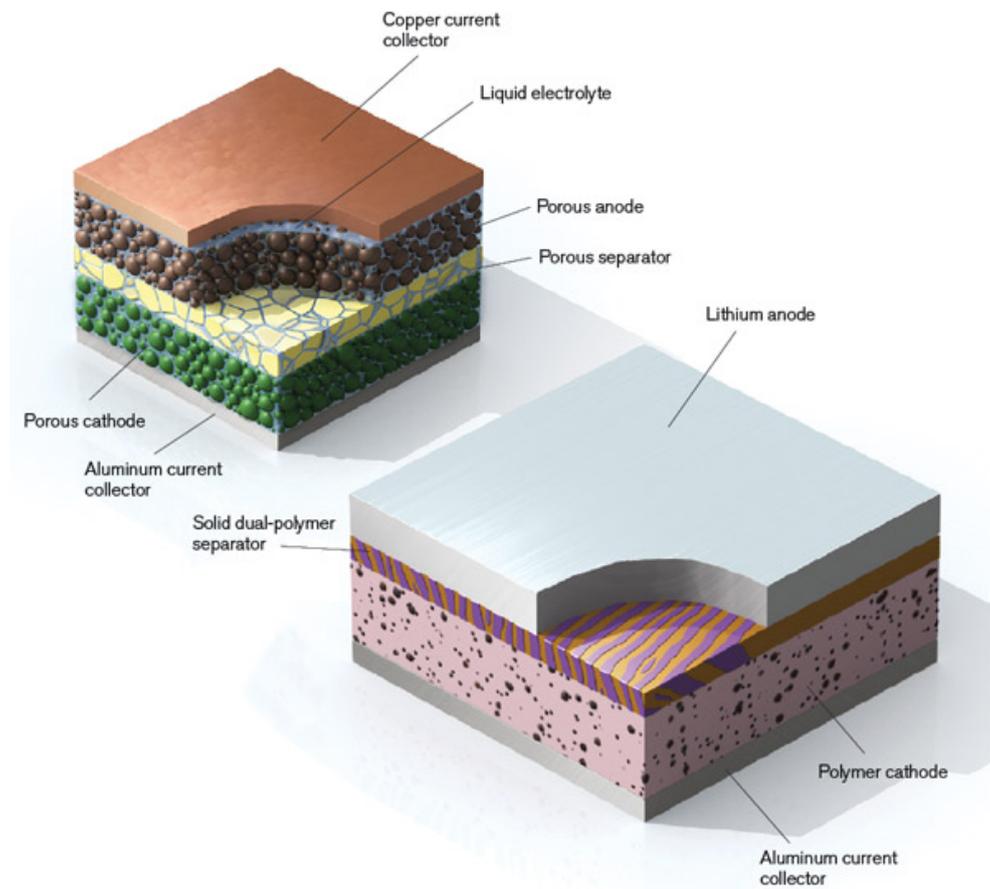


Ilustración 5 - Comparación de una batería convencional y una de estado sólido

Ejemplos de tales materiales incluyen: Ag_4RbI_5 para conducción de plata (Ag^+), mezclas de $\text{LiI}/\text{Al}_2\text{O}_3$ para conducción de litio (Li^+), y el grupo de compuestos de arcilla y β -alúmina ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$) para sodio (Na^+) y otros iones mono y divalentes. A temperatura ambiente la conductividad iónica de un solo cristal de sodio β -alúmina es de 0,035 S/cm, comparable a la conductividad de una solución 0,1 M HCl. Esta conductividad, sin embargo, se reduce en una batería en un factor de 2-5, debido al uso de materiales en polvo o de cerámica en lugar de cristales simples. Materiales vítreos y poliméricos que pueden ser fácilmente concebidos en forma de película fina, mejorando así la capacidad del sistema en general, son de creciente interés en la industria.

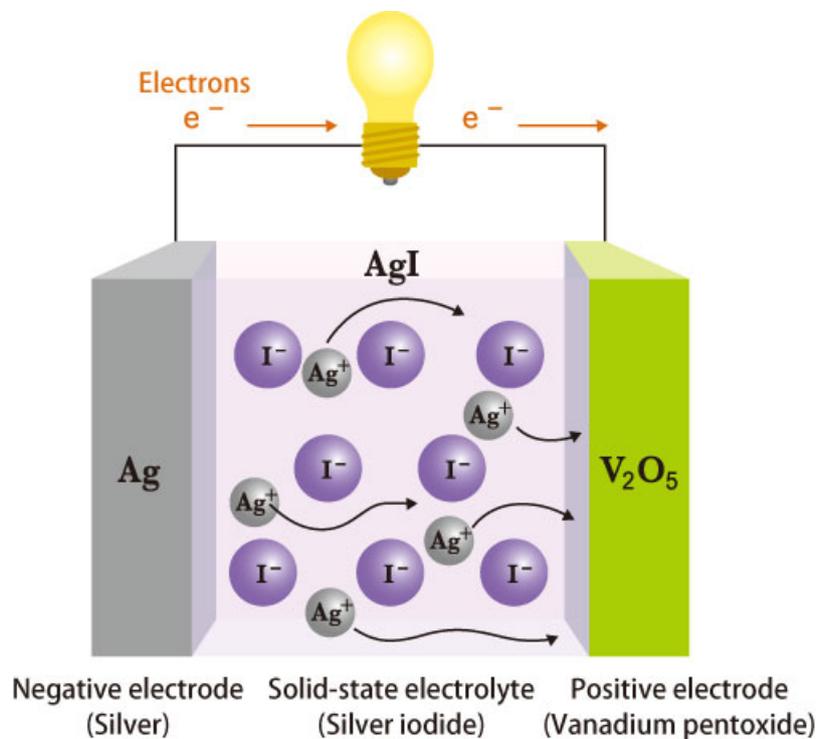


Ilustración 6 - Vista esquemática de una batería de estado sólido de ión plata

Las baterías de estado sólido por lo general caen en la categoría baja densidad de potencia y alta densidad de energía. Las anteriores limitaciones surgían debido a la dificultad de obtener corrientes a través de las interfaces sólido-sólido. Sin embargo, estas baterías tienen algunas ventajas que compensan esta desventaja: son fáciles de miniaturizar (por ejemplo, pueden ser construidas en forma de película fina), y no hay ningún problema con los derrames de electrolitos. Tienden a tener una vida útil muy larga, y por lo general no tienen cambios bruscos en el rendimiento con la temperatura, como pueden estar asociados con el congelamiento o hervor de electrolitos.

CI's EnerChip de Cymbet

El EnerChip CC es el primer dispositivo inteligente de almacenamiento de energía de estado sólido. Es una solución integrada que ofrece una batería de respaldo y administración de energía para sistemas que requieren alternar fuentes y/o suministros de energía secundarios. Un solo EnerChip CC puede cargar hasta 9 EnerChips adicionales conectados en paralelo.

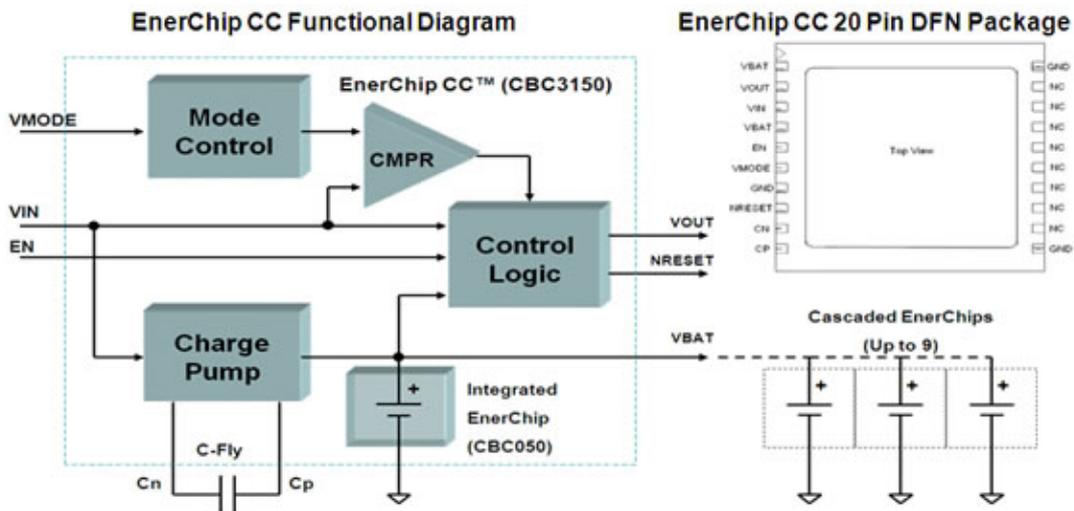


Ilustración 7 - Diagrama funcional de un EnerChip CC

Durante el funcionamiento normal, el EnerChip CC se carga a sí mismo con una tensión controlada usando una fuente de carga interna que opera desde 2.5V a 5.5V. Un pin de "ENABLE" controla la fuente de carga con el fin de minimizar el consumo de corriente y aprovechar el tiempo de recarga rápida de los EnerChip. Cuando el suministro de energía primario cae por debajo de un umbral de tensión definido por el usuario, el EnerChip CC marcará este evento y direccionará la energía almacenada hacia el pin "Vout". El EnerChip CC también tiene un circuito de protección de la batería que permite miles de ciclos de recarga.



Ilustración 8 - Vista de un EnerChip CC [CBC3150](#)

Celdas de micro-energía (MEC) de Infinite Power Solutions

La serie THINERGY de Infinite Power Solutions (IPS) consiste en celdas de micro-energía (MEC) flexibles, recargables, de película fina y de estado sólido. Este dispositivo único sustancialmente supera a todas las demás tecnologías de almacenamiento de energía electroquímica de formato pequeño, incluidos los súper capacitores, las baterías impresas, y otras baterías de película fina. El dispositivo está fabricado sobre un sustrato laminar de metal para lograr su flexibilidad, un perfil delgado, un amplio rango de temperatura, y larga vida.



Ilustración 9 - Vista de una celda THINERGY [MEC202](#)

	EnerChip CC CBC3150	THINERGY MEC202	AA NiMH
Capacidad	50 μ Ah	2,5 mAh	3000 mAh
Corriente	100 μ A	100 mA	~ 1000 mA
Power management	Si	No	No
Ciclos de recarga	>5000	100.000	~ 200
Tensión (V)	3,3	4,0	1,2
Tiempo de carga (min)	20	10	360
Auto-descarga (anual)	1,5 %	1 %	15 %
Tamaño (mm)	9 x 9 x 0.9	50,8 x 25,4 x 0,17	50 x 14 \emptyset

Tabla 2 - Comparación de los distintos tipos de baterías utilizadas en EH

Estudio del consumo durante una transmisión

A continuación vamos a proceder a estudiar el consumo durante la transmisión RF del dispositivo de Texas Instruments eZ430-RF2500 (end device). Para analizar el perfil de corriente de la aplicación se propone el siguiente set-up de medición.

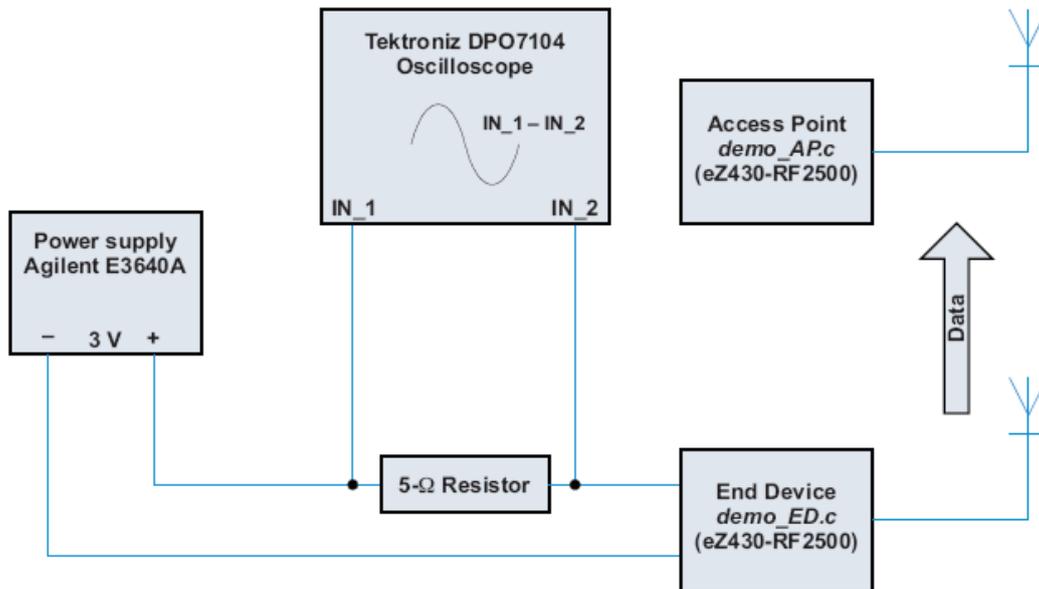


Ilustración 10 - Set-up de medición sobre el end device eZ430-RF2500

La captura de osciloscopio que se observa a continuación en la ilustración 11 muestra el perfil de corriente del end device sobre cinco segundos. Puede apreciarse que el end device está enviando información al access point cada un segundo. A fines prácticos, al disminuir el duty-cycle vamos a prolongar el funcionamiento del end device con las mismas baterías.

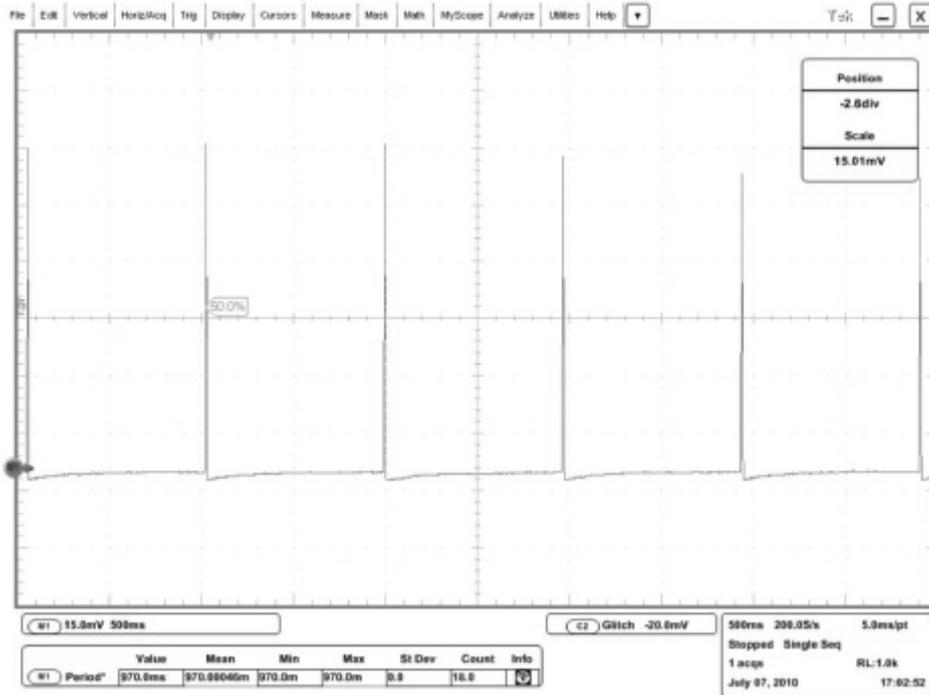


Ilustración 11 - Perfil de corriente del end device (cinco segundos)

La ilustración 12 muestra uno de los picos de corriente después de decrementar el time-step en el osciloscopio. A esta escala de tiempo la señal puede ser analizada más cercanamente para los distintos eventos de hardware y software y su consumo de potencia. Cada etapa de la transmisión es analizada mas adelante.

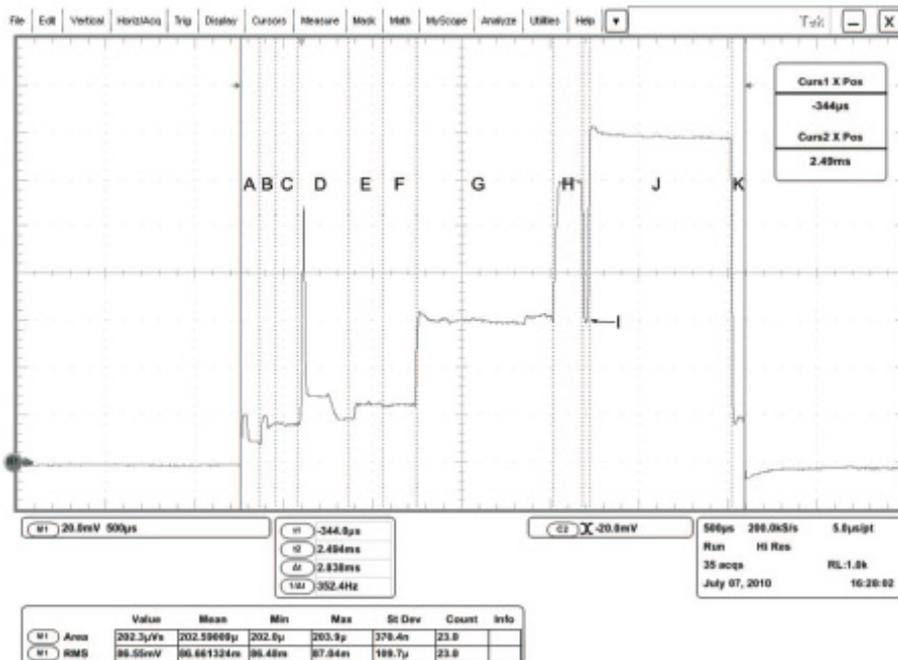


Ilustración 12 - Perfil de corriente del end device durante la transmisión

En la tabla 3 y en la siguiente discusión sobre consumo de corriente se describen las contribuciones más significativas de potencia y el flujo de programa tanto en hardware como en software.

Hardware	Corriente	Software	Tiempo de ejecución
Modos Sleep		Oscilador (D en la ilus. 12)	
MSP430 low-power mode 0 (LPM0)	1,1 mA	XOSC startup time	300 μ s
MSP430 low-power mode 3 (LPM3)	900 nA	Ripple counter (E en la ilus. 12)	
CC2500 estado sleep	400 nA	Timeout antes de CHP_RDY Hi→Lo	150 μ s
MSP430 Modo Activo		PLL (G en la ilus. 12)	
8 MHz = DCO = SMCLK, 3 V	2,7 mA	Calibración del sintetizador de RF	809 μ s
MSP430 ADC10		Muestra de temperatura (A en la ilus. 12)	
$f_{\text{ADC10CLK}} = 5,0 \text{ MHz}$, ADC10ON = 1, REFON = 1, REFOUT = 0, ADC10DIV = 0x4 (ADC10CLK / 5)	850 μ A	ADC10 REFON + retraso por estabilización	30 μ s
		LPM0 + Sync + muestra de temp. (64 \times ADC10CLKs) + Conversión (13 \times ADC10CLKs)	48 μ s
CC2500 Modos Activos		Muestra de V_{CC} (B en la ilus. 12)	
Idle	1,5 mA	ADC10 2,5-V REFON + retraso por estabilización	30 μ s
Calibración del PLL	7,4 mA	LPM0 + Sync + muestra de V_{CC} (16 \times ADC10CLKs) + Conversión (13 \times ADC10CLKs)	7 μ s
Receptor (RX) (señal de entrada débil, DEM_DCFILT_FILT_OFF = 0,250 kbps)	18,8 mA	Mensaje manejando overhead (C y F en la ilus. 12)	
Transmisor (TX) (250 kbps, potencia de salida 0-dB)	21,2 mA	Calcular temperatura y V_{CC} del resultado de la muestra del ADC (MSP430 activo y radio en idle)	140 μ s
		Transmitir mensaje al TX FIFO y preparar transmisión del mensaje (SMPL_Send) (MSP430 activo y radio en idle)	140 μ s
		Modos RX/TX (H, I y J en la ilus. 12)	
		Modo RX (clear channel assessment, CCA)	180 μ s
		Cambio entre RX y TX	30 μ s
		Modo TX (transmisión del mensaje)	800 μ s
		Modos low-power del radio y el MCU (K en la ilus. 12)	
		CC2500 se prepara para sep; apaga el cristal de 32 MHz (MSP430 activo y radio en idle)	70 μ s

Tabla 3 - Contribuciones significantes de corriente y tiempo

Las contribuciones del MSP430 al flujo del programa y al consumo de energía son directas y pueden observarse a través de un análisis del firmware de nivel de aplicación. Los eventos de radio, sin embargo, son abstractos al usuario por diseño y se producen con frecuencia por defecto, ejecutados por el hardware e invisibles para el programador.

Los eventos de radio se indican mediante las líneas de puntos (ilustración 12), mientras que los eventos del MSP430 no se muestran explícitamente. Los eventos A y B ocurren cada vez que la radio se “despierta” del modo SLEEP al modo IDLE por una llamada `SMPL_Iocctl(IOCTL_OBJ_RADIO, IOCTL_ACT_RADIO_AWAKE, 0)`. Los eventos C y D se producen cada vez que la radio se pone en un estado de recepción desde el IDLE.

1. Inicio XOSC - D

XOSC es el oscilador del CC2500, utilizado para accionar el reloj del chip.

2. Ripple Timer Timeout – E

Un seteo dentro de los registros de configuración del radio especifica cuántas veces un contador de ripple debe agotarse después de una exitosa rutina de inicio XOSC antes de la señalización del símbolo de chip listo del CC2500 (flanco negativo en `CHP_RDY`). En este caso, el requisito es de 64 Timeouts, o 150 μ s.

3. IDLE \rightarrow RX + calibración PLL - G

Al cambiar de estado IDLE a cualquiera de los modos de RX o TX, el PLL (el sintetizador de frecuencia en el chip utilizado para (de-)modulación de RX y TX) se calibra automáticamente de acuerdo con un ajuste dentro de los registros de configuración del radio. Este sintetizador de frecuencia debe ser calibrado con regularidad, y toma 809 μ s para entrar en el modo de RX o TX desde el estado IDLE del radio.

4. Modo RX - H

El modo de recepción es necesario para una transmisión exitosa de modo que una evaluación de canal libre (Clear Channel Assessment, CCA) se pueda realizar antes de la transmisión. El chequeo CCA se hace para comprobar que el radio no está actualmente recibiendo un paquete y que otra señal en el canal no está registrando un valor de RSSI (Receive Signal Strength Indication, Indicador de fuerza de señal de recepción) sobre un cierto umbral (en efecto, se comprueba si otro radio ya se encuentra transmitiendo en la canal de interés). Si el canal está ocupado, el protocolo SimpliciTI espera durante un tiempo aleatorio y realizará un nuevo CCA. Cuando el CCA se ha completado, el radio entonces puede cambiar a modo TX para transmitir su información. A través de este procedimiento, SimpliciTI mantiene un algoritmo “escuchar antes de hablar”, o Carrier Sense Multiple Access (CSMA) para la comunicación entre nodos.

Debido a estos cuatro requisitos del radio, es importante entender que la transmisión de los datos (tiempo de permanencia en el modo TX) sólo es parcialmente responsable de la mayoría del consumo de corriente total. Gran parte del consumo total está directamente vinculado al proceso de inicialización de cada transmisión en el CC2500 y en el MSP430. Es, por lo tanto, importante maximizar la cantidad de datos que pueden ser enviados por transmisión y minimizar el número de transmisiones por unidad de tiempo.

En la tabla 4 se calcula el consumo de corriente previsto para la aplicación. Los eventos del radio y del MSP430 se muestran separados.

Evento del radio	Corriente consumida	Tiempo de ejecución	Amp * seg consumidos
Inicio XOSC	2,7 mA	300 μ s	810 nAs
Ripple counter timeout	1,75 mA	150 μ s	262 nAs
Modo IDLE	1,5 mA	375 μ s	563 nAs
Calibración PLL	7,5 mA	809 μ s	6067 nAs
Modo RX	18,8 mA	180 μ s	3384 nAs
Modo TX	21,2 mA	800 μ s	16960 nAs
		Total	28047 nAs
Evento del MSP430	Corriente consumida	Tiempo de ejecución	Amp * seg consumidos
Corrie. MSP430 activo	2,7 mA	2,705 ms	7304 nAs
Corrie. MSP430 LPM0	1,1 mA	55 μ s	61 nAs
ADC10 activo	850 μ A	115 μ s	98 nAs
		Total	7463 nAs
		Total transmisión	35508 nAs

Tabla 4 - Consumo de corriente previsto

El cálculo de corriente promedio también debe tener en cuenta la corriente en SLEEP del end device. Cuanto mayor es el periodo de transmisión, mas significativa se vuelve la contribución de la corriente en modo SLEEP al promedio general.

$$\begin{aligned}
 \text{sleep_current_contrib} &= (\text{MSP430 idle current} + \text{CC2500 idle current}) \times \\
 &(\text{period_of_transmission} - \text{application_execution_time}) \\
 &= 1,3 [\mu\text{A}] * (1 [\text{s}] - 2,838 [\text{ms}]) \\
 &= \mathbf{1,296 \mu\text{As}}
 \end{aligned}$$

El consumo de corriente promedio para la aplicación puede entonces determinarse usando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{average_current_consumption} &= (\text{sleep_current_contrib} + \text{transmission_total}) / \\ &\text{period_of_transmission} \\ \text{average_current_consumption}_{\text{EXPECTED}} &= (1,296 [\mu\text{As}] + 35,508 [\mu\text{As}]) / 1 [\text{s}] \\ &= \mathbf{36.80 \mu\text{A}} \end{aligned}$$

Para calcular la expectativa de vida de un end device en la red, y asumiendo el uso de dos típicas baterías AAA (en serie) con una capacidad de 1000 mAh bajo la hipotética condición en que las baterías mantienen su voltaje idealmente hasta que la capacidad es agotada:

$$\begin{aligned} \text{hours_of_operation} &= \text{current_rating} / \text{average_current} \\ &= 1000 [\text{mAh}] / 0.03680 [\text{mA}] = 27173 [\text{hs}] / 24 [\text{hs/día}] = 1132 [\text{días}] / 365 [\text{días/año}] \\ &= 3,10 \text{ años} \\ &= \mathbf{3 \text{ años, 1 mes, y 6 días}} \end{aligned}$$

En la ilustración 13 se grafica la expectativa de años de operación debido al consumo de potencia de un end device realizando transmisiones a distintos intervalos de tiempo, verificando que para minimizar el consumo de potencia de la aplicación, el programador debe siempre:

1. Minimizar el número de transmisiones.
2. Colocar tantos bytes en el paquete de transmisión como sea factible para la aplicación.

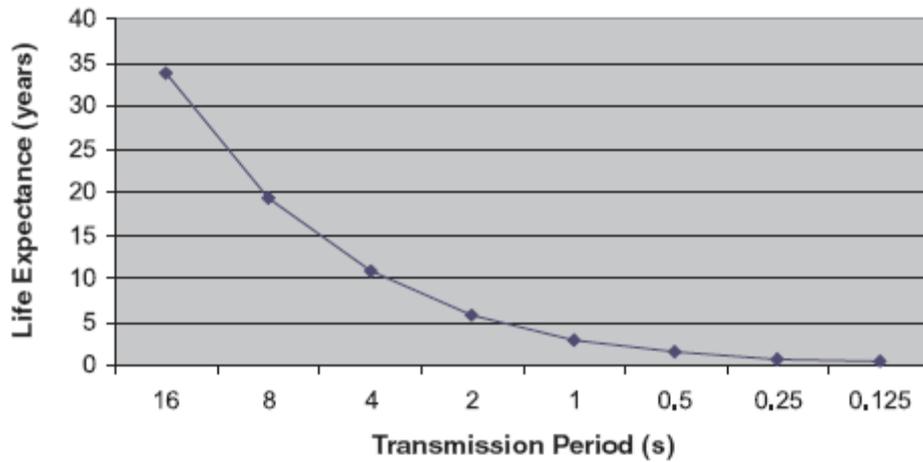


Ilustración 13 - Años de operación vs. intervalo de transmisión

Cabe señalar que en el mundo real, la expectativa de vida de la aplicación es menor debido a pérdidas de la batería, disipación de potencial de la misma, auto-descarga, etc. y a los requerimientos mismos de la aplicación (por ejemplo, la referencia de 2,5 V para el ADC10). Para mitigar estos efectos se pueden seleccionar baterías que mantengan su nivel de tensión el mayor tiempo posible e implementar una función que cambie el voltaje de referencia del ADC10 y lo reduzca a 1,5 V una vez que la tensión de la batería comience a decrecer. Estas consideraciones van a ayudar a extender la vida útil del sistema.

Energy Harvesters

Cosechadores de energía

A continuación se van a detallar cuatro sistemas de recolección de energía para ejemplificar cual es la actualidad en cuanto a productos disponibles y kits de desarrollo y a sus características eléctricas para poder analizar el rendimiento de los mismos.

Los productos a estudiar son los siguientes:

1. CBC-EVAL-11 Inductive Charger

El mismo es un kit de demostración de la marca [Cymbet](#) para la recolección de energía mediante inducción de Radio Frecuencia (RF). Este kit es uno de los cuales formarán parte de la exposición.

2. eZ430-RF2500-SEH

Este kit de desarrollo de [Texas Instruments](#) se basa en el uso de la energía solar y en el almacenamiento de la misma. Este es el otro sistema que ha sido adquirido para exponerse.

3. PMG FSH

Este producto de la marca [Perpetuum](#) hace uso de las vibraciones que puedan encontrarse en motores, maquinas en general e incluso ferrocarriles, para convertir las mismas en energía utilizable.

4. TE-Power NODE

Aquí presentamos un termo-generador de la firma [Micropelt](#) el cual, como fue indicado, es capaz de transformar calor en energía eléctrica.

CBC-EVAL-11 Inductive Charger

Información general

El [CBC-EVAL-11](#) es un kit de demostración que combina un transmisor inductivo con una placa receptora que contiene un EnerChip CC CBC3150, dispositivo de almacenamiento de estado sólido con administración de energía integrado. La placa transmisora opera a 13,56 MHz y obtiene su energía de un puerto USB. Además del EnerChip CC, la placa receptora tiene una antena plana para recibir alimentación de la placa del transmisor, un capacitor de salida para entregar pulsos de corriente para las transmisiones de radio, y un conector para una placa con, por ejemplo, un microcontrolador y/o un transmisor.

Descripción del sistema

El CBC-EVAL-11 es un cargador inductivo de RF para el CBC3150 con administración de almacenamiento de energía integrado y emulación de recolección de energía. El sistema CBC-EVAL-11 consiste de un módulo transmisor inductivo inalámbrico sintonizado a una frecuencia de 13,56 MHz y un módulo cargador inductivo (receptor). El módulo transmisor está diseñado para ser alimentado por un puerto USB de computadora.

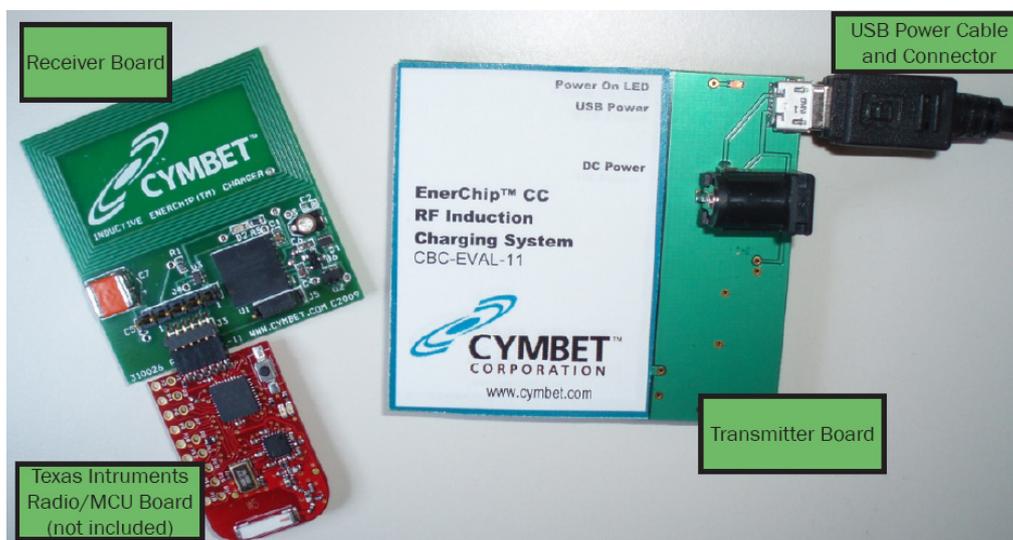


Ilustración 14 - CBC-EVAL-11 Evaluation Kit

El módulo receptor inalámbrico inductivo consiste en una bobina plana fabricada en la placa de circuito impreso en paralelo con un capacitor variable. Este circuito forma un circuito tanque resonante sintonizado a una frecuencia de 13,56 MHz, lo que a su vez alimenta la entrada de CA de un rectificador puente de onda completa. La salida de CC del rectificador es filtrada por un capacitor y limitada por un diodo Zener. La salida de CC es entonces regulada por un regulador lineal de 3,3 V y dirigida a la entrada del Cymbet CBC3150. El CBC3150 tiene un circuito de gestión de energía y una celda recargable de película fina EnerChip de 50 μ Ah. Cuando la antena del receptor del CBC-EVAL-11 se coloca cerca de un campo magnético con una frecuencia de 13,56 MHz, y si la tensión en el pin VDD del CBC3150 es superior a 3,0 V, el CBC3150 dirigirá la energía cosechada directamente a los conectores de captación de energía. En este modo de operación la línea de RESET/ del CBC3150 estará en 1, el LED se iluminará, y el indicador CHARGE/ en los conectores de captación de energía estará en 0. En este modo, el dispositivo de almacenamiento de energía de estado sólido integrado EnerChip, se cargará de un estado completamente agotado al 80% de carga completa en 30 minutos. Cuando la unidad CBC-EVAL-11 se retira del campo magnético y la tensión de entrada al CBC3150 cae por debajo de 3,0 V, la línea de RESET/ estará en 0, el LED se apagará, y la energía del EnerChip se dirigirá a los conectores de captación de energía. El indicador CHARGE/ en los conectores de captación de energía estará forzado a 1. Para capacidad adicional de almacenamiento de energía, hasta 9 dispositivos de almacenamiento adicionales CBC050 de EnerChip pueden ser conectados al pin VBAT del CBC3150.

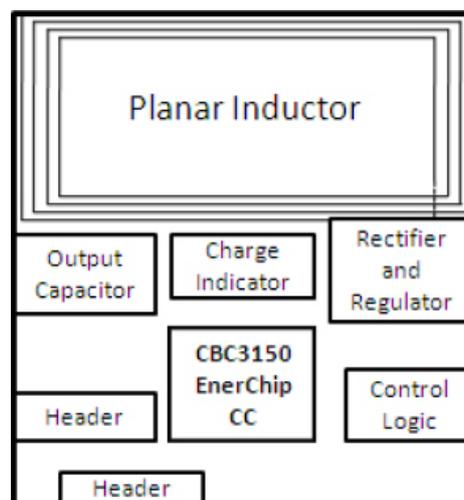


Ilustración 15 - Diagrama en bloques de la placa receptora

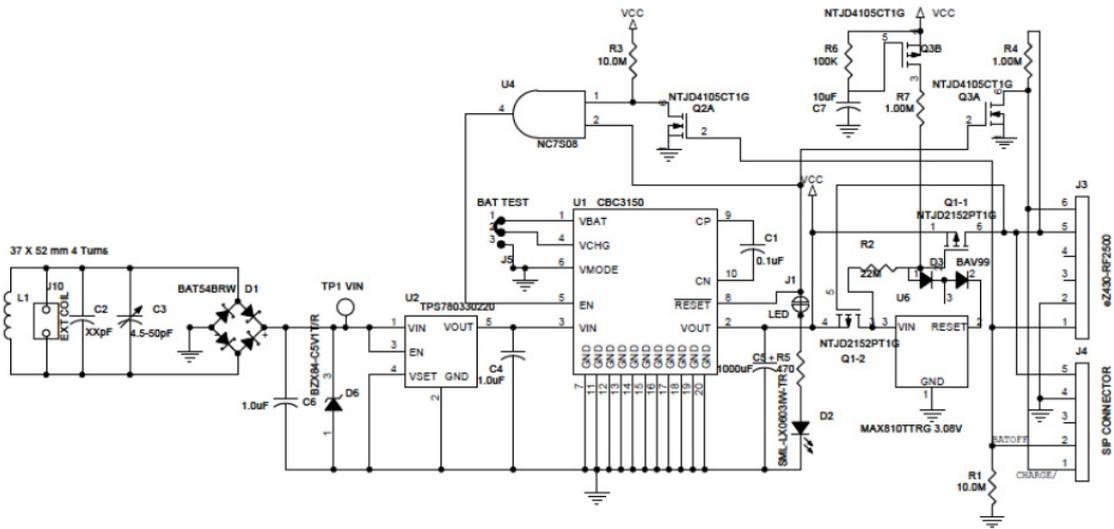


Ilustración 16 - Esquemático de la placa receptora

El transmisor inalámbrico de inducción consta de un convertidor DC-DC para elevar la entrada de 5V a 9V. Un oscilador de cristal es utilizado para generar un clock de 13,56 MHz, que a su vez se utiliza para accionar varios buffers y un transistor que activa un inductor plano y capacitor en serie, formando un circuito resonante serie sintonizado a una frecuencia de 13,56 MHz.

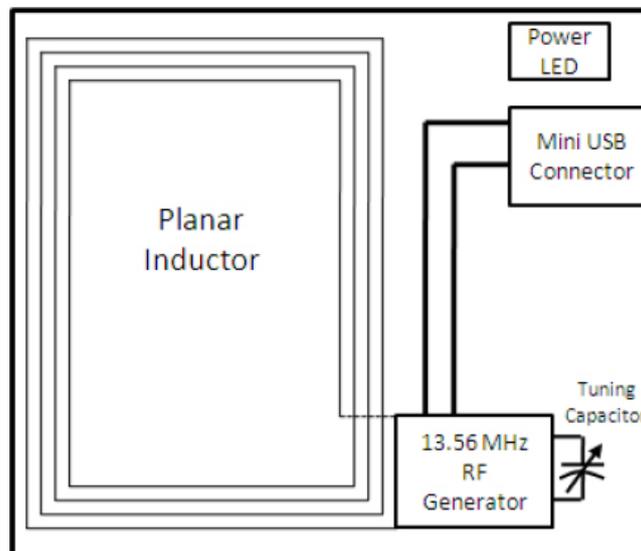


Ilustración 17 - Diagrama en bloques de la placa transmisora

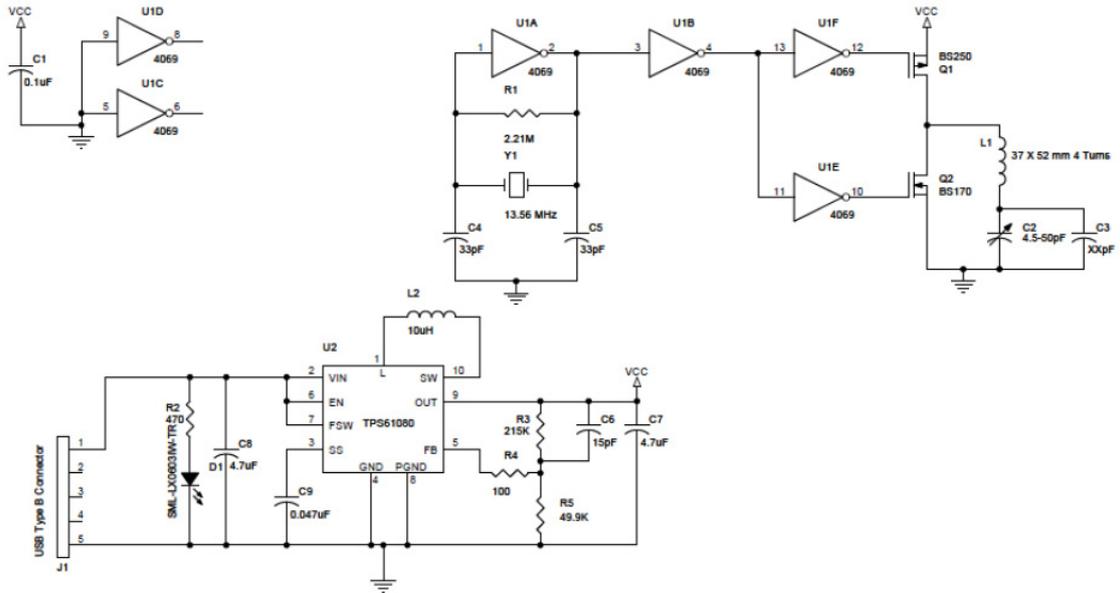


Ilustración 18 - Esquemático de la placa transmisora

TI eZ430-RF2500-SEH

Descripción funcional

La tecnología central detrás del módulo de captación de energía solar es la celda fotovoltaica o solar que convierte la luz del ambiente en energía eléctrica. La energía proveniente de la celda solar debe ser convertida, acondicionada y almacenada. Este proceso es manejado por el EnerChip EH CBC5300, la pequeña placa DIP montada en el módulo de cosecha de energía solar (SEH-01). Un convertidor boost es utilizado para aumentar el voltaje de la celda solar hasta un nivel suficiente para cargar la batería de película fina y hacer funcionar el resto del sistema.

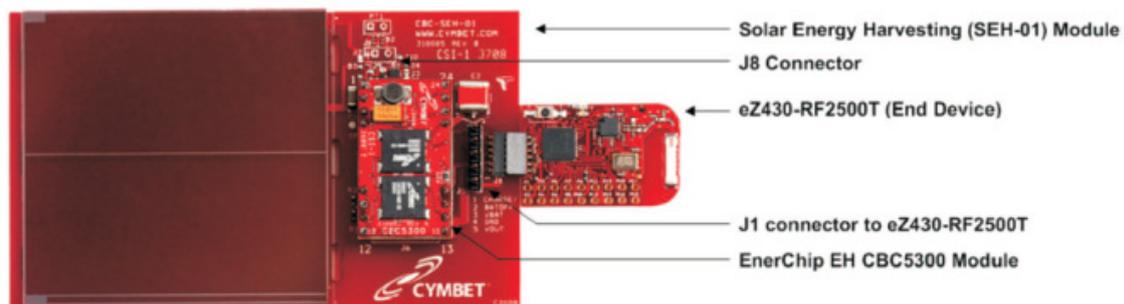


Ilustración 19 - [eZ430-RF2500-SEH](#)

El bloque de control de carga monitorea continuamente la salida del convertidor boost. Si la salida del convertidor boost cae por debajo del voltaje necesario para cargar el EnerChip, el controlador de carga desconecta el convertidor boost del sistema para prevenir potencia de retorno hacia el mismo en condiciones de poca luz.

El bloque de administración de energía evita que el EnerChip se descargue completamente en condiciones de poca luz o bajo corrientes de carga anormalmente altas. También asegura que la carga sea alimentada con una suave transición en el encendido. El bloque de administración de energía tiene una línea de control, CHARGE/, que le indica al MSP430 que el colector de energía solar está cargando el EnerChip. La línea de control de entrada, BATOFF, está disponible para que el MSP430 se auto-aísle del EnerChip para conservar la vida de la batería en prolongadas condiciones de poca luz.

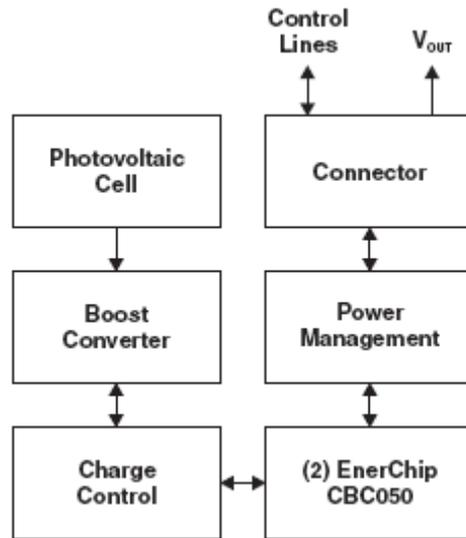


Ilustración 20 - Diagrama en bloques

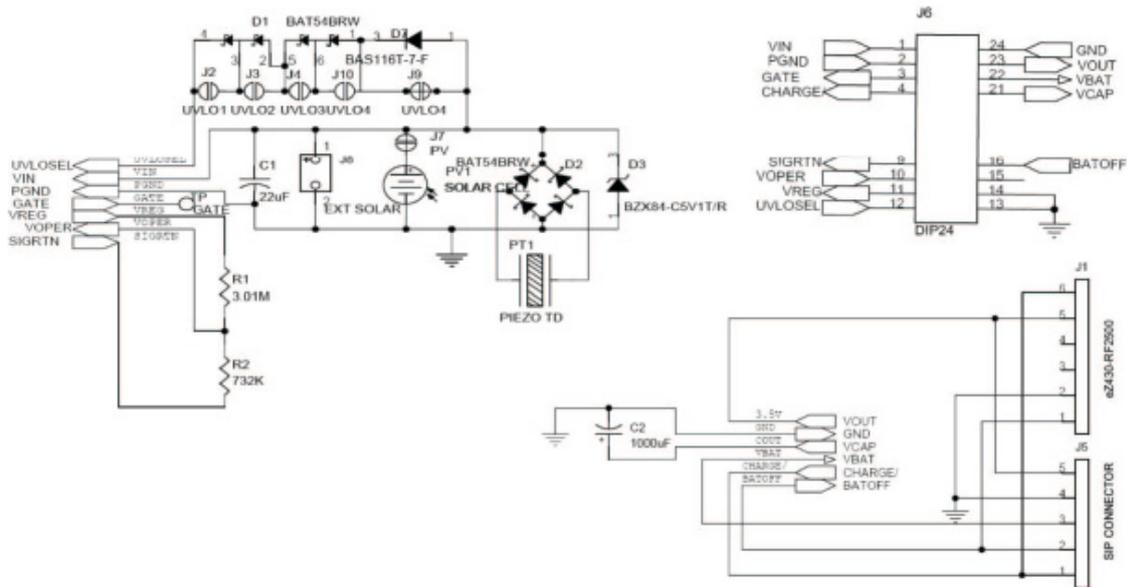


Ilustración 21 - Diseño esquemático

El módulo de cosecha de energía solar cuenta con dos baterías EnerChip montadas en la placa con una capacidad de 100 μ Ah y un capacitor de 1000 μ F para pulsos de alta corriente durante las transmisiones inalámbricas.

Utilizando las señales de estado y control del bloque de administración de energía en el SEH-01, el firmware en el MSP430 ha sido escrito para que la aplicación sea "consciente de la energía" para maximizar la vida útil total del sistema.

PMG FSH

Aprovechamiento de la energía de vibración

En pocas palabras, la cosecha de energía de vibración es el proceso por el cual la vibración (de una pieza de maquinaria industrial, por ejemplo), de otro modo desperdiciada, se aprovecha y se convierte en energía eléctrica útil para poder alimentar de manera perpetua a nodos de sensores inalámbricos (WSN). Una de las aplicaciones de mayor relevancia de las WSN's es monitorear la salud y el estado de los activos esenciales de la maquinaria industrial en entornos de manufactura ligera e industria pesada. El valor de las WSN's en la industria es el fácil y económico despliegue de puntos de control y medición en áreas de la planta que no sería económicamente viable mediante el uso de soluciones tradicionales cableadas. Estos activos existen en la planta, cerca de la planta y en lugares remotos.

Hasta hace poco, la única fuente de energía disponible para alimentar una WSN han sido las baterías. Con su tiempo de vida limitado, contenido peligroso, el transporte y los requisitos de eliminación, las baterías por sí solas no constituyen una fuente de energía que durará el ciclo de vida de la aplicación WSN sin intervenciones por mantenimiento. Con la adición de un cosechador de energía de vibración, habrá suficiente energía sin mantenimiento más allá del ciclo de vida de la aplicación WSN.

Construcción y funcionamiento interno de un VEH electromagnético

En un cosechador de energía de vibración (VEH) electromagnético una bobina conectada a una masa oscilante cruza un campo magnético que se establece por medio de un imán permanente. La bobina atraviesa una cantidad variante de flujo magnético, lo que induce un potencial de corriente alterna de acuerdo a la ley de Faraday.

La firma Perpetuum altero esto de manera de hacer al sistema más ventajoso, moviendo, en cambio, la estructura magnética (que es de una masa mayor) y manteniendo la bobina fija. Consiguiendo así un aumento de la potencia de salida y una

mayor confiabilidad de las conexiones eléctricas. La tensión resultante se regula a niveles convenientes para su uso y almacenamiento.

Fuente de vibración

No todas las vibraciones son iguales en el mundo de la recolección de energía. El hecho de que una estructura u objeto vibre (incluso a niveles excesivos) no lo convierte automáticamente en un candidato viable como fuente de vibración adecuada para la cosecha de energía. La vibración de la fuente debe tener ciertas características para que sea utilizable.

Las siguientes pautas permitirán determinar si una fuente de vibración es adecuada:

- Frecuencia de resonancia: El objeto fuente de la vibración debe tener un componente de frecuencia conocida y repetitiva dentro de un rango. Esto proporciona la frecuencia de sintonización óptima para que el cosechador de vibraciones trabaje a su máximo potencial.
- Nivel de vibración: El nivel g RMS de vibración es la otra consideración a tener en cuenta. Una vez que el VEH está sintonizado en frecuencia para obtener un máximo desplazamiento de la masa, el nivel de g RMS del objeto fuente de la vibración determinará la potencia de salida del VEH. La utilidad de un VEH en entornos industriales será su capacidad para producir energía suficiente a bajos niveles de vibración. Niveles más altos de vibración generan una mayor potencia de salida.

Ancho de banda: Ventana de operación máxima

La siguiente consideración es el ancho de banda. Como se ve en la ilustración 22, en la frecuencia central, la cosechadora alcanza la potencia máxima de salida (~ 50 mW) a 1 g RMS de la fuente de vibración con un ancho de banda de más de ± 10 Hz. A la frecuencia central con una fuente de vibración de 25mg RMS, la potencia de salida es de ~1 mW con un ancho de banda de $\pm 1,0$ Hz. En resumen, a niveles bajos de

vibración, la potencia de salida y el ancho de banda se reducen. Por el contrario, a niveles superiores de vibración (1 g) la potencia es máxima y el ancho de banda es mucho mayor. Los corrimientos en frecuencia fuera de la frecuencia central a niveles bajos de vibración causarán una disminución en la potencia de salida dentro de una pequeña ventana de ancho de banda.

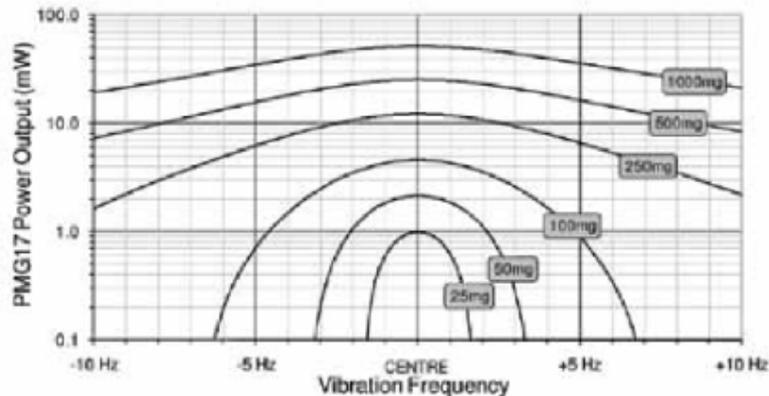


Ilustración 22 - Espectro de potencia de salida

Características del PMG FSH:

- Potencia de salida: 4 mA @ 5 V (20 mW)
- Cosecha estabilizada en frecuencia y ancho de banda para todo el rango de temperatura industrial
- Agujero pasante central para fácil instalación
- Certificaciones ATEX, IECEx, y CSA Zone 0 para áreas peligrosas
- Alta confiabilidad, intrínsecamente seguro y sellado hermético
- Conector estándar IEC de tres pines para la toma de energía



Ilustración 23 - Vista de un VEH [PMG FSH](#)

TE-Power NODE

Termo-energía

Esta tecnología de cosecha de energía es capaz de reemplazar fuentes de alimentación basadas en baterías con infinita termo-cosecha de energía que se alimenta con fuentes de calor puntual (líneas de cobre de alta corriente, cañerías de agua caliente, etc.). Los beneficios de este tipo de fuente de alimentación son: alta confiabilidad y bajo impacto ambiental debido a la ausencia de la química de las baterías, operación virtualmente libre de servicios, verdadera instalación inalámbrica.

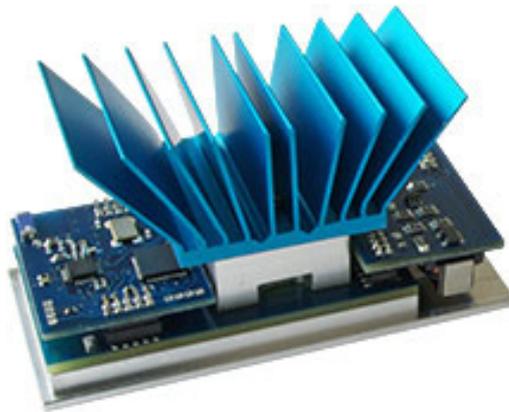


Ilustración 24 - Vista de un [TE-Power NODE](#)

El kit TE-Power NODE consiste en un disipador de calor en conjunto con un generador termo-eléctrico (TEG) [MPG-D751](#), basado en tecnología de [Efecto Peltier](#). El modulo DC Booster (DBM) convierte el “termo-voltaje” del generador a 2,4 V, cargando un capacitor de reserva de 100 μ F. Esto, además, alimenta el modulo sensor inalámbrico basado en la tecnología de Texas Instruments de ultra bajo consumo (microcontrolador MSP430). Una diferencia de temperatura tan pequeña como 10 °C de ΔT neta entre la superficie destino y el aire ambiente es suficiente para poder transmitir 13 bytes de información una vez por segundo.

ΔT neta [°C]	mAh por año	Número equivalente de baterías tipo AA
35	3.628	2-4
75	21.207	11-20

Tabla 5 - Comparación contra baterías convencionales

Potencia de salida

La cosecha de energía utilizando un generador termo-eléctrico es ideal para aplicaciones de bajo ciclo de trabajo. La salida en bruto del TEG es convertida a un voltaje constante que suministra de manera directa la alimentación requerida por el sistema en modo SLEEP. El excedente de energía es almacenada en un capacitor o batería recargable para utilizarse durante los periodos de actividad de la carga.



Ilustración 25 - Un [TE-qNODE](#) adherido a una línea de alta corriente

El WSM en el TE-Power NODE

El modulo sensor inalámbrico (WSM) esta construido alrededor del microcontrolador de ultra bajo consumo MSP430 y el transceptor CC2500 de 2,4 GHz, ambos de Texas Instruments. Dos sensores digitales de temperatura están conectados al microcontrolador mediante la interfaz I²C, los mismos están montados cercanos a los lados caliente y frío del termo-generador, sensando la llamada ΔT neta a través del TEG. Otros dos sensores compatibles con I²C pueden ser conectados. Dicha información es captada por una computadora mediante el receptor ez430-RF2500 USB para su análisis.

Temperatura de la fuente [°C]	ΔT neta a través del TEG [°C]	Voltaje del TEG a circuito abierto [V]	Potencia del TEG sobre impedancia adaptada [mW]
40	3,7	0,6	0,2
50	7,2	1,2	0,7
60	10,1	1,7	1,4
70	13,7	2,3	2,5
80	20,3	2,9	4,1
90	23,6	3,6	5,7
100	28,1	4,3	8,3

Tabla 6 - Características termo-eléctricas típicas del TEG

Conclusión

Los sistemas de sensores inalámbricos son cada vez más frecuentes debido al aumento de los costos de instalación de sistemas de sensores cableados, la disponibilidad de nodos sensores de bajo costo, y los avances en la tecnología de sensores. Los nodos de sensores inalámbricos autónomos basados en la cosecha de energía son una solución rentable y conveniente. El uso de la recolección de energía elimina uno de los factores clave que limitan la proliferación de los nodos inalámbricos, la escasez de fuentes de energía con las características necesarias para suministrar la energía y el poder para el nodo sensor por años sin cambio de batería. Las ventajas económicas son notorias cuando se instalan sensores inalámbricos de potencia cero frente a soluciones cableadas. Ahorros adicionales son percibidos al eliminar los altos costos de reemplazo de baterías. La combinación de transductores de captación de energía, un módulo de poder de recolección de energía, un sensor de baja potencia, un procesador consciente de la energía, y un enlace de RF optimizado da muestra de la realidad de las redes de sensores inalámbricos de potencia cero, larga vida, y libres de mantenimiento.

Bibliografía

- “EnerChip CC CBC3150 (Rev. C), Datasheet, Cymbet Corporation, 2010”
- “Enerchip EH CBC5300 (Rev. 09), Datasheet, Cymbet Corporation, 2009”
- “CBC-EVAL-11 Inductive Charger (Rev. B), Datasheet, Cymbet Corporation, 2010”
- “Using the EnerChip CC in Energy Harvesting Designs (Rev. A), Application Note 1036, Cymbet Corporation, 2011”
- “Zero Power Wireless Sensor (Rev. 1), White Paper, Cymbet Corporation, 2009”
- “<http://www.cymbet.com/design-center/energy-harvesting.php>”
- “eZ430-RF2500-SEH Solar Energy Harvesting Development Tool, User's guide, Texas Instruments, Mayo 2010”
- “Energy Harvesting, White Paper, Murugavel Raju, Mark Grazier, Texas Instruments, Abril 2010”
- “Wireless Sensor Monitor Using the eZ430-RF2500 (Rev. D), Application Report, Miguel Morales, Zachery Shivers, Texas Instruments, Abril 2011”
- “MSP430F22x2, MSP430F22x4 Mixed Signal Microcontroller (Rev. F), Datasheet, Texas Instruments, Julio 2011”
- “CC2500 Low-Cost Low-Power 2.4 GHz RF Transceiver (Rev. C), Datasheet, Texas Instruments, 2011”
- “Thienergy MEC202 (Rev. 1.1), Datasheet, Infinite Power Solutions, Septiembre 2011”
- “Getting Started with Vibration Energy Harvesting (Rev. 7), Perpetuum”
- “PMG FSH, Datasheet, Perpetuum, Mayo 2010”
- “TE-Power NODE (Rev. 3e), Datasheet, Micropelt, Mayo 2011”
- “MPG-D651, MPG-D751 (Rev. 1e), Datasheet, Micropelt, Febrero 2010”
- “http://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_battery”
- “http://en.wikipedia.org/wiki/AA_battery”
- “http://www.stefanv.com/electronics/using_nimh.html”