

ENERGY HARVESTING: Captando energía para el internet de las cosas y los sensores que las vigilan

ENERGY HARVESTING: GATHERING ENERGY FOR THE INTERNET OF THINGS AND THE SENSORS BEHIND



DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7143> | Recibido: 23/04/2014 • Aceptado: 09/07/2014

■■■
Ivan Arakistain

TECNALIA RESEARCH AND INNOVATION, Polígono Lasao,
Area Anardi 5, 20730 Azpeitia (Gipuzkoa) Tel. 902 760 000
ivan.arakistain@tecnalia.com

ABSTRACT

- Sensing systems based on energy harvesting are very attractive both for users and developers given their energy autonomy, avoiding the use of batteries that need replacing.

This article analyzes some of the basic considerations for the design of self-powered, ambient energy based electronic systems and a practical application example is given.

The article analyzes the way in which energy harvesting technology and ultra- low-power electronics can promote the development of the Internet of things, showing its technological relevance for the future.

- **Keywords:** Energy harvesting, batteryless, radio frequency, finger press, microcontroller.

RESUMEN

Los sistemas de sensorización basados en *energy harvesting* resultan muy atractivos tanto para usuarios como desarrolladores dada su autonomía energética, evitando la necesidad de pilas que necesiten ser reemplazadas.

En este artículo se analizan algunas de las consideraciones más relevantes para el diseño de sistemas electrónicos energéticamente autosuficientes, basados en una fuente de energía ambiental y se proporciona un ejemplo práctico de aplicación.

En el artículo, se analiza el modo en el que la tecnología de *energy harvesting* y la electrónica de ultra bajo consumo pueden impulsar el desarrollo del Internet de las Cosas, mostrándose su relevancia tecnológica para el futuro.

Palabras clave: *Energy harvesting*, sin pilas, radio frecuencia, pulsación, microcontrolador.

1. INTRODUCCIÓN

Las baterías fueron la principal fuente de energía desde que fueron inventadas en 1799 por Alessandro Volta [1] hasta que se empezaron a cablear las ciudades a finales del siglo XIX [2]. A partir de ese momento, éstas fueron relegadas a aplicaciones móviles siendo ampliamente utilizadas en dispositivos de electrónica de consumo a partir de la década de 1960. En la década de 1980, la idea de ubicar cada vez más sensores y en los lugares más insospechados fue cuajando, mientras a su vez, aumentaba la capacidad de cómputo de los sistemas embebidos [3]. Sin embargo, esta idea iba acompañada del inconveniente de disponer energía para todos ellos. A día de hoy, las baterías son adecuadas a nivel de costes, y se trata de una tecnología de alimentación bien entendida por los usuarios. Sin embargo, presentan inconvenientes específicos que incluyen una vida útil definida, el costo de reemplazo y de eliminación. Hasta el día de hoy representan uno de los puntos débiles de las redes de sensores de gran tamaño [4].

Actualmente algunos dispositivos energéticamente autónomos de marcas comerciales como Enocean se encuentran en uso comercial dada su sencilla instalación (ver Fig. 1) y ventajas tecnológicas.

Sin embargo, utilizan un protocolo propietario que limita el número de fabricantes que lo utilizan y su coste es muy elevado perjudicando su aceptación. Además, sólo se permite la venta de su transductor electromecánico ECO 200 junto con dispositivos de su misma marca.

Y por otra parte, la comunicación es unidireccional, limitando las posibilidades de cooperación con otros elementos. Resulta deseable por tanto el disponer de una solución con un protocolo de comunicación libre con posibilidades de comunicación bidireccional, un generador electromagnético sin restricciones legales y componentes ampliamente disponibles en el mercado a precios reducidos. Es reseñable que el transductor ECO 200 aporta una salida en circuito abierto de 5V, mientras que el transductor electromagnético utilizado en el ejemplo planteado genera un pulso de tan solo 3V a la salida.

El artículo expone el proceso de diseño de un elemento transmisor que cumple con estas características permitiendo además la comprensión de los principales requisitos envueltos en el desarrollo de este tipo de soluciones con un amplio abanico de aplicaciones.



Fig. 1: Instalación de sensores en el edificio experimental para el análisis de la eficiencia energética

Las ventajas de la cosecha de energía o *energy harvesting* (término inglés que se refiere al proceso por el cual se aprovecha la energía residual presente en el ambiente para producir energía eléctrica que puede ser almacenada o utilizada para alimentar pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo) son que eliminan o reducen la necesidad de baterías, alargan la vida de servicio, aligeran los sistemas y a la larga los hacen más económicos. Por ello, instituciones de prestigio como “Massachusetts Institute of Technology” (MIT) prevén que las redes de sensores inalámbricas y etiquetas de “Radio-frequency Identification” (RFID) activas observarán casi todo, incluyendo el tráfico, el tiempo, la actividad sísmica, los procesos industriales, la productividad de los empleados, y el estado de edificios y puentes entre otros, a una escala mucho más precisa que antes [5]. Varios analistas prevén que en los próximos años el mercado para los sistemas de energy harvesting ronde los 250 millones de dólares anuales [6].

2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, muchos fabricantes de circuitos integrados compiten por la fabricación de microcontroladores adecuados para circuitos basados en energy harvesting. Microchip es uno de los mejor colocados con su gama XLP, por encima de los MC9S08QE de Freescale y de los Cortex-M0 de ARM.

Mientras que la familia MSP430 de Texas Instruments resulta atractivo por su coste reducido y utilización en diversos kits de evaluación.

Utilizando algunos de estos microcontroladores se han desarrollado trabajos de investigación que demuestran la viabilidad de transmitir paquetes de información captando energía mediante transductores piezoeléctricos y electromagnéticos [7], [8]. En la actualidad hay numerosas empresas que están trabajando en aplicaciones con tecnologías de energy harvesting. Entre ellas, Powerleap, Pavegen e Innowattech han desarrollado sistemas de pavimentos que generan electricidad aprovechando el paso de las personas, los vehículos o los trenes y Tremont Electric comercializa un producto que aprovecha la energía generada por una persona cuando camina. En entornos de edificios destacan las soluciones de sensorización energéticamente autónoma de la ya mencionada empresa alemana EnOcean [9], así como el destacable desarrollo de la empresa suiza Algra [10] que ha desarrollado un interruptor alimentado a través de la pulsación sobre una piezo-membrana. En ambos casos se trata de soluciones protegidas y con protocolos de comunicación propietarios lo que eleva su coste para el usuario final.

3. FUENTES DE ENERGIA Y CONVERSION EN ENERGIA ELECTRICA

Actualmente se trabaja en nuevos sistemas de energy harvesting que colectan la energía desde múltiples fuentes junto a las que se citan trabajos relevantes que se basan en estas tecnologías, incluyendo la luz ambiental [11], vibración o energía mecánica [12], termoeléctrica [13], y la que proviene de campos electromagnéticos [14]. Los sofisticados métodos de conversión de la energía y su uso óptimo permiten que los módulos con energy harvesting operen con una fracción de la energía normalmente requerida por un nodo sensor *wireless* también denominado *Mote*.

Las fuentes más comunes de energía disponibles en el entorno y los órdenes de magnitud de energía eléctrica que se puede obtener de cada una se describen en la Tabla 1:

Fuente de energía	Energía eléctrica obtenida
Radio frecuencia	<1uW/cm ² (para campo lejano)
Luz ambiental	100mW/cm ² con luz solar directa 100uW/cm ² con luz reflejada
Termoeléctrica	60uW/cm ²
Vibración /Mecánica	4uW/cm ² para movimiento humano (del orden de Hz) 800uW/cm ² para vibraciones del orden de KHz

Tabla 1: Valores típicos de la energía captada con diferentes tecnologías (fuente: Texas Instruments)

3.1. TRANSDUCTORES DE ENERGIA

Los transductores, son los dispositivos que convierten una forma de energía en otra, siendo frecuente su conversión en

energía eléctrica (ver Tabla 1), aunque existe una gran variedad, entre los más habituales están:

- **Electromecánicos:** dentro de este grupo están los denominados transductores cinéticos. En estos transductores de inercia, la potencia de salida se maximiza cuando la frecuencia de resonancia del transductor se “corresponde” con la frecuencia de movimiento. Por ejemplo, el movimiento de las personas es una combinación de baja frecuencia (<10 Hz) así como vibraciones que varían de una actividad a otra y de persona a persona. Por lo tanto, la caracterización de las propiedades requiere un estudio en profundidad del movimiento humano (por ejemplo, las frecuencias asociadas con los diferentes tipos de movimientos) y los patrones de movilidad humana [15].
- **Fotovoltaicos:** la tecnología fotovoltaica es una tecnología que convierte la luz directamente en electricidad. El método más conocido para generar energía solar es mediante el uso de células solares y se trata de una tecnología bastante madura.

Este artículo no pretende profundizar en los transductores de energía ya que esta materia es tan amplia que requeriría una disertación completa.

3.2. CONVERSION Y ALMACENAMIENTO DE LA ENERGIA

Dado que los transductores producen mínimas cantidades de energía, y la fuente de esta no siempre está disponible, puede ser necesario un elemento de conversión y almacenamiento de energía (ver Fig. 2). Un criterio para la toma de decisión en cuanto al sistema de conversión, almacenamiento y gestión de energía (si es necesario para nuestra aplicación), es la corriente de carga. En aplicaciones basadas en energy harvesting, las corrientes de carga son tan solo del orden de micro-amperios o unos pocos miliamperios. Por lo tanto, el sistema de almacenamiento de energía también debería de ser capaz de recargarse con esas corrientes tan bajas. Con este fin, existen los circuitos integrados gestores de carga que se colocan entre el transductor y el sistema de almacenamiento como el circuito integrado LTC3588-1 el cual integra un rectificador de onda completa de pequeñas pérdidas [15] realizando las funciones de conversión. El integrado permite que la carga se vaya acumulando en un condensador, hasta que el conversor interno pueda transferir una porción de la carga almacenada al pin de salida del circuito. Mediante la selección de pines, se pueden obtener tensiones de salida de 1.8V, 2.5V 3.3V y 3.6V.

Al mismo tiempo, los desarrolladores se enfrentan a otro reto. Algunas aplicaciones requieren corrientes entre 10 a 50mA en cortos periodos de tiempo cuando la electrónica se encuentra en su modo activo, especialmente cuando se utiliza la transmisión wireless. Por ello es necesario tener en cuenta los requerimientos de corriente para que el sistema de almacenamiento pueda proporcionar los niveles requeridos en los instantes precisos.

Las dos principales tendencias de almacenamiento de energía son las Baterías de ion-litio e los Ultracondensadores.

3.2.1. Baterías de ion-litio

Solo los sistemas de almacenamiento que permiten un gran número de ciclos de recarga son realmente prácticos. Las baterías de ion-litio por ejemplo, solamente tienen una vida útil

de 1000 ciclos de recarga, lo que equivale a dos o tres años. Una tecnología de almacenamiento de energía nueva es la de las “baterías de película fina”. Esta tecnología se puede aplicar en cuerpos sólidos, lo que permite el funcionamiento seguro y ambientalmente sostenible. Los materiales generalmente utilizados son el dióxido de cobalto de litio (LiCoO₂) para el cátodo y litio u otro metal como ánodo. Aunque la cantidad de litio utilizada es bastante pequeña, la Unión Europea no tiene todavía una categoría separada para este tipo de producto, por lo que las normas en cuanto a la gestión de residuos son las mismas que para las baterías de Li-ion normales.

3.2.2. Ultracondensadores

Mientras que un típico condensador electrolítico tiene una capacitancia de decenas de miliFaradios (mF), la de un ultracondensador del mismo tamaño será de varios Faradios, o sea alrededor de dos o tres órdenes de magnitud mayor, pero generalmente con una menor tensión de trabajo. A pesar de su elevado precio, una de sus grandes ventajas es su larga vida útil.

4. DESARROLLO ELECTRONICO DE ULTRA BAJO CONSUMO PARA CIRCUITOS ALIMENTADOS MEDIANTE ENERGY HARVESTING

Una vez analizada la parte de captación, conversión y almacenamiento de energía, el artículo se centrará con mayor profundidad en el desarrollo de sistemas electrónicos que se valgan de éstos. Para ello, a continuación se presenta el diagrama de bloques de un circuito típico alimentado mediante técnicas de energy harvesting.

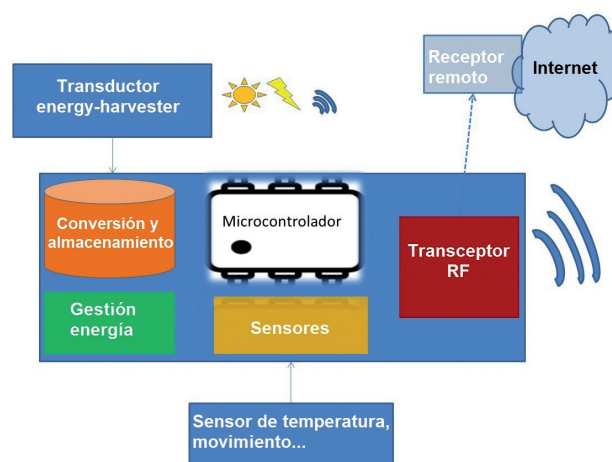


Fig. 2: Diagrama de bloques de un nodo “wireless” alimentado por un sistema de “energy harvesting”

4.1. SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

En las aplicaciones de ultra bajo consumo energético, el consumo total de energía es decisivo en el caso del microcontrolador (1).

$$\text{Consumo total de energía} = \text{Consumo en modo activo} + \text{Consumo en modo "sleep"} + \text{Consumo en despertar} \quad (1)$$

Por tanto, los siguientes criterios son importantes para la selección del microcontrolador adecuado:

- Máxima capacidad de computación con un mínimo consumo ($\mu\text{A}/\text{MHz}$) en modo activo. Valores de pico de $110\mu\text{A}/\text{MHz}$ son alcanzados en la industria.
- Consumo de energía en modo *sleep*. En este estado, el microcontrolador debe de ser capaz de actualizar el estado de los registros y requerir unos pocos nano Amperios.
- Tiempo de despertar: El microcontrolador debe de ser capaz de pasar del modo *sleep* al modo activo en unos pocos microsegundos.
- Configuración flexible de periféricos: Dado que el transmisor Wireless y otros dispositivos de medida externos se conectan generalmente a interfaces de comunicación serie como “*Serial Peripheral Interface*” spi o “*Inter-Integrated Circuit*” i²c (si no están integrados en el microcontrolador), es importante que estos interfaces puedan ser configurados de manera independiente a la frecuencia de reloj del microcontrolador a fin de ahorrar energía.

A continuación se presentan las características de algunos microcontroladores, entre ellos el MSP430F2274 que ha sido seleccionado para el desarrollo debido a su amplia disponibilidad comercial y coste reducido así como por su mínimo consumo en estado activo (*Itx*). Junto a él se analizan otros microcontroladores comerciales (ver Tabla 2).

- Microcontrolador MSP430F2274

Este microcontrolador es de la familia de potencia ultra-

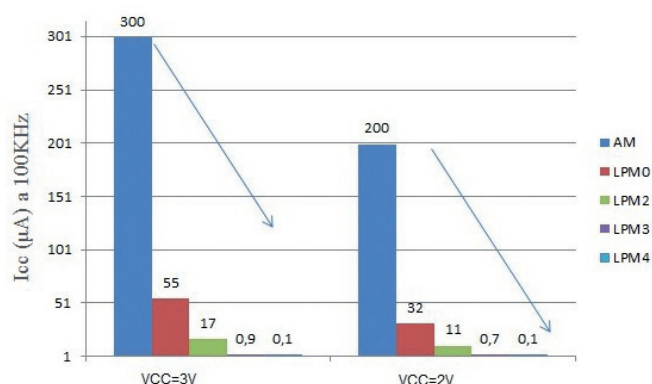


Fig. 3: Consumo de corriente de un MSP430F2274 en los 5 diferentes modos

baja MSP430 de Texas Instruments. Pueden ser usados en una gran variedad de aplicaciones. La arquitectura, combinada con cinco modos de conservación de energía, optimiza su consumo total de energía.

En el dispositivo destaca una “*Central Processing Unit*” (CPU) de 16 bits, registros de 16 bits y generadores constantes que contribuyen a maximizar la eficiencia del código. El oscilador controlado digitalmente, “*Digitally Controlled Oscillator*” (DCO) permite cambiar el estado de los módulos de bajo consumo a modo activo en menos de $1\mu\text{s}$. La característica de ultra bajo consumo de la familia MSP430 proviene de los cinco modos de trabajo (LPM0-LPM4) logrados mediante la desactivación selectiva de algunos de los relojes internos del microcontrolador [16].

La técnica más útil para ahorrar energía en el sistema es extender al máximo el tiempo en el modo LPM3 porque el consumo de energía es inferior a $2\mu\text{A}$ y todas las interrupciones están activas sólo con el reloj auxiliar de trabajo.

4.2. SELECCIÓN DEL MÓDULO DE TRANSMISIÓN WIRELESS

El sistema de transmisión *wireless* también debe de contribuir a ahorrar energía ya que es el componente que requiere unos mayores picos de corriente en los instantes de transmisión. En las aplicaciones con *energy harvesting*, prima el alcance frente a la tasa de transferencia de datos. Además, los protocolos *wireless* con capacidad de auto organización (*Mesh Networking*) también son de ayuda ya que permiten extender el alcance de la red.

A continuación se presentan las características de algunos módulos de transmisión más habituales, entre ellos el seleccionado CC2500 porque se integra en el módulo comercial de bajo coste Ez430-RF2500 y que se analizará con más detalle. Se puede ver que sus características que en general resultan peores en cuanto a consumo de energía que los de otros dispositivos (ver Tabla 3).

El mayor consumo de un módulo de transmisión se produce en el instante que dura en envío de los paquetes de datos, requiriendo una corriente importante (ver Figura 4), lo que nos conduce a la inevitable necesidad de reducir al máximo la duración de los periodos de transmisión.

Con el fin descrito, se puede optar por utilizar protocolos de comunicación propios o comerciales como un desarrollo reciente en este sentido llamado “*Internet Protocol v6 via low*

Marca	Modelo	Frecuencia [KHz]	Ratio de datos [Kbaud]	U [V]	Isleep[uA]	Itx [mA]
TI	CC2510Fx	2.400	500	2...3,6	0,3 /	15,5-26
TI	CC1110Fx	315...915	500	2...3,6	0,3 /	19-36,2
MC	rfPIC12F675x	315-434	40	2...5,5	0,6 /	4-14
JE	JN5139-x	2.400	n/d	2,7...3,6	2,6 /	37
SE	SX1282	437/868	80	1...1,6	4 /	n/d
AT	ATA862-x	310...928	32	2...4	<1 /	11
AT	ATA874x	310...928	32	2...4	0,2 /	9,6
TI	MSP430F2274	1.000	200	1,8...3,6	0,1 /	0,27

Tabla 2: Listado de algunos microcontroladores con ultra bajo consumo de energía

Marca	Modelo	Frecuencia [MHz]	Ratio de datos [Kbps]	U [V]	ITX (0 dBm) [mA]
SE	XE1209	0,036	1,82	2...3,2	1,8
AT	ATA8403	868/928	50	2...4	8,5
AT	ATA5429	915	20	2,4...3,6	9,6
EM	EM9201	2.400	2.000	1,9...3,6	11,5
AT	AT86RF230/231	2.400	IEEE	1,8...3,6	12
TI	CC1101	Sub GHz	500	1,8...3,6	14,8
AT	AT86RF212	868/928	1000	1,8...3,6	15
HRF	RF12	315/433/868/915	256	2,2...5,4	13-17
SE	SX1211	868/928/950	200	2,1...3,6	16
TI	CC2500	2.400	250	1,8...3,6	21,2

Tabla 3. Algunos módulos de transmisión de bajo consumo

power wireless personal networks” (6LowPAN) que funciona con los chips wireless IEEE802.15.4.

- Módulo de transmisión CC2500

El CC2500 es un transceptor diseñado para aplicaciones de bajo consumo a 2.4Ghz [17, 18]. Su circuitería trabaja dentro de la banda frecuencial “Industrial, Scientific and Medical” (ISM) (entre 2400MHz a 2483.5MHz). Soporta varios tipos de modulación llegando hasta 500Kbaudios. Es capaz de almacenar datos, trabajar con paquetes e indicar la calidad del canal de enlace.

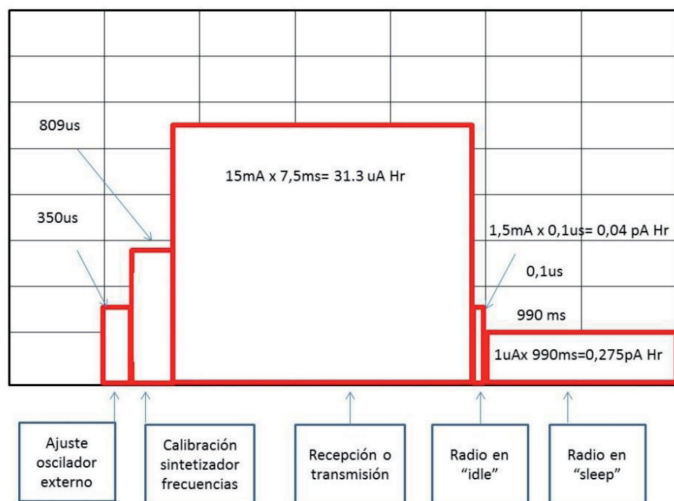


Fig. 4: Temporización de funcionamiento típico de un transmisor sin restricciones de energía disponible

En el desarrollo que se mostrará en el punto 5 relativo a la discusión de un ejemplo práctico, se ha optimizado la temporización de microcontrolador y transmisor, logrando transmitir un paquete de datos en menos de 2ms obteniendo el correspondiente ahorro de energía con respecto al funcionamiento típico. Por otra parte, también se puede optar por reducir la

ganancia en decibelios (dB) del transmisor (reduciendo el alcance) que se modifica a través de registros. En el desarrollo no ha sido necesario reducir la ganancia típica.

4.3. DISEÑO DEL PCB

Una vez que se han seleccionado los componentes del circuito y se ha descrito el esquemático en un programa de diseño de PCB, se pasa al rutado de la placa comenzando por colocar los componentes en el lugar que ocuparán en la placa.

Al asignar la localización de los componentes en el PCB y trazar el rutado de la placa se recomienda:

- Colocar los componentes evitando el cruce de señales.
- Rutar de las señales de voltaje y sensado sólo donde se necesiten y asignar un área específica para las señales digitales.
- Cubrir el espacio libre del PCB con una capa de cobre conectada a masa para desacoplar las interferencias electromagnéticas irradiadas y evitar que afecten a otros circuitos.
- Evitar cualquier tipo de acoplamiento capacitivo o inductivo.

Tomar en cuenta estas consideraciones nos lleva a tener trazos más cortos y los caminos de retorno de señal identificados. Es importante no rutar las señales donde no se necesitan, esto ayuda a no tener problemas de interferencias, así como

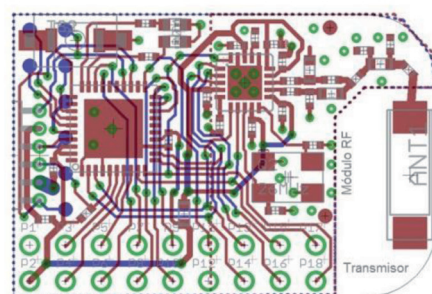


Fig. 5: Rutado de una placa de ultra bajo consumo

respetar los espesores de pista recomendados por el fabricante según el tipo de señal.

4.4. ESCRITURA DEL SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR

Es indispensable utilizar un estilo de escritura de software eficiente en el uso de los recursos siempre limitados y utilizar un estilo lineal de código, evitando los bucles.

Un microcontrolador a menudo está activo sólo durante una fracción del tiempo efectivo. El resto, por lo general alrededor 99% del tiempo, puede estar en distintos estados de espera. A partir de estos estados de suspensión es despertado a través de interrupciones y los iniciadores pueden ser, por ejemplo, un temporizador o un nivel de tensión externa. El consumo de energía se puede lograr reducir en varios órdenes de magnitud mediante el uso inteligente de los estados de suspensión que ofrece.

5. DISCUSION DE UN EJEMPLO PRÁCTICO

5.1. TRANSMISIÓN DE UN PAQUETE DE DATOS CON LA ENERGÍA GENERADA CON LA PULSACIÓN

A continuación se presenta el desarrollo de un módulo inalámbrico sin batería –energéticamente autónomo–, alimentado por un convertidor de energía electromecánico impulsado por el movimiento un dedo. El módulo gestiona y almacena la energía convertida, y envía las señales correspondientes a través de un enlace de radio - frecuencia (CC2500) para uno o varios receptores. El módulo puede enviar un código de identificación programable (ID) en la portadora de RF, a fin de permitir el etiquetado módulo y de seguimiento por la unidad receptora. La arquitectura y el funcionamiento han sido validados de forma experimental en un prototipo fabricado, incluyendo un convertidor electro-mecánico, y basado en un microcontrolador MSP430F2274.

Para los microcontroladores de Texas Instruments, hay varias opciones en cuanto al entorno de desarrollo para su programación, tales como IAR WORKBENCH y CODE

COMPOSER STUDIO. En este caso, se ha utilizado CODE COMPOSER STUDIO V5.4.0 para la programación [19, 20]. A continuación se describe la función del código para el microcontrolador MSP430F2274.

5.1.1. Módulo Emisor

El módulo emisor está la mayor parte del tiempo sin energía, dado que su única fuente de energía es proporcionada por la carrera mecánica del dedo del usuario. En el momento en el que el usuario proporciona energía cinética y el transductor electro-mecánico junto con la electrónica de conversión lo traduce a un rango de voltaje válido para el microcontrolador, este se inicializa.

Cuando se enciende el microcontrolador, se configura el módulo de radio y transmite un paquete de datos con un identificador único. Una vez finalizada esta operación, el microcontrolador casi ha consumido toda la energía disponible y cuando lo hace se apaga.

5.1.2. Módulo Receptor

El módulo receptor está configurado de manera que puede estar todo el tiempo en modo RX (recepción), de manera que cuando un paquete de datos es recibido con el código definido, éste será detectado. Cuando se detecta el código predefinido, se cambia el estado de un diodo LED verde que está unido al puerto P1.0.

Ha sido necesario resolver diversos problemas relacionados con el receptor para garantizar un correcto funcionamiento. Por un lado, en algunas ocasiones se produjo una falsa activación. Este problema se ha resuelto, al restablecer a cero los registros de recepción una vez que el paquete de datos ha sido recibido. Por otro lado, este microcontrolador tiene un oscilador interno en lugar de una señal de reloj externa, por lo que es necesario llevar a cabo una re-calibración periódica debido al *drifting* del receptor. En la Figura 6, se puede ver en el comienzo de los ajustes y el inicio de la configuración de la interfaz de periféricos con conexión serie (SPI). Esta operación se inicia principalmente cuando MSP430 es alimentado. El registro GDO0 está configurado para mostrar el final de paquetes TX (transmisión), de manera que se calcula que el tiempo total es de 1,5ms. Parte de este tiempo (alrededor de 850µs) se utiliza para la calibración del módulo de radio, después de lo cual, se envían los datos.

En las condiciones experimentales, el prototipo cuenta con un tiempo típico para eventos de transmisión con duraciones inferiores a 2 milisegundos (ver Fig. 6). El consumo de ener-

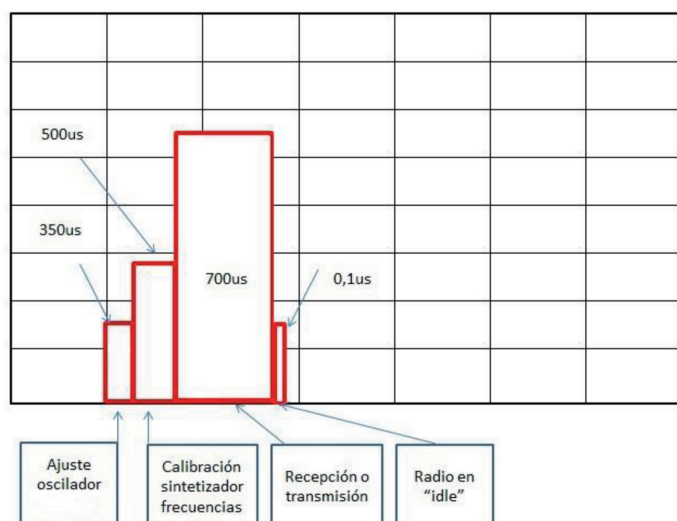


Fig. 6: Temporización de la transmisión de un paquete de datos optimizado para un mínimo consumo de energía

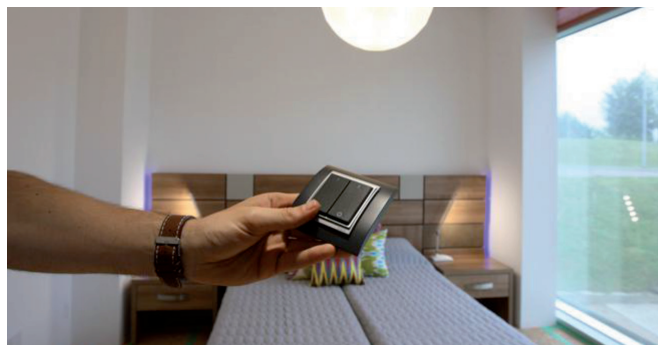


Fig. 7: Interruptor energéticamente autosuficiente

gía de pico durante la transmisión es del orden de 20mW y el rango operativo es del orden de decenas de metros en un entorno de laboratorio (sin tabiques). Los resultados obtenidos muestran que el enfoque propuesto tiene características atractivas debidas a la ausencia total de las baterías.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El *energy harvesting* es un ámbito de la electrónica en auge debido a las nuevas posibilidades que ofrece a la hora de crear dispositivos electrónicos energéticamente autónomos tal y como indica este artículo. Se ha mostrado mediante el ejemplo práctico, que se pueden obtener resultados prometedores con generadores electromagnéticos de pequeñas dimensiones que aprovechan la energía mecánica proporcionado por el usuario, así como la utilidad de técnicas de reducción de consumo de energía en los sistemas electrónicos descritos. Estos sistemas están basados en tecnología microelectrónica, que en este caso se aplica al desarrollo de microsistemas autónomos que reducen al máximo su consumo de energía y resultan plenamente funcionales.

Para los trabajos futuros se podría comenzar por aportar conectividad a las redes de comunicaciones a los nodos basados en *energy harvesting*, así como una comunicación bidi-

reccional entre nodos que permitiera una mayor interacción. La tecnología *energy harvesting* puede impulsar el Internet de las Cosas (IdC), proporcionando la posibilidad de disponer de nodos autoalimentados, sin baterías. Pudiendo incluso interactuar de manera gestual con los mismos [21]. Los campos de aplicación del IdC son muchos y muy variados. La sanidad, para monitorizar a los pacientes y conectarlos a los médicos y demás profesionales sanitarios; los sectores de la energía y del transporte, para conectar a proveedores y clientes; el sector del comercio, las telecomunicaciones y los servicios de información; los servicios financieros; o las fábricas inteligentes.

Gracias a la existencia de nodos energéticamente autónomos (virtualmente sin mantenimiento) y conectables en red, el IdC supone un cambio en las formas de inteligencia distribuida. Hay que tener en cuenta el impacto que Internet ha tenido sobre la educación, la comunicación, las empresas, la ciencia, el gobierno y la humanidad. Ahora debemos tener en cuenta que IdC aporta un salto en su capacidad para reunir, analizar y distribuir datos que podemos convertir en información y conocimiento. Aun así, son varias las barreras que amenazan con retrasar el desarrollo de IdC, como el desarrollo de fuentes de energía barata y durable para multitud de sensores diminutos. Este proceso requerirá de próximos avances en las técnicas de *energy harvesting* y en los circuitos electrónicos que se valen de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] British Encyclopaedia, bajo: Conte Alessandro Volta. *Online* <http://global.britannica.com/EBchecked/topic/632433/Conte-Alessandro-Volta>
- [2] Biografía de Thomas Edison. *Online* <http://www.thomasedison.com/biography.html>
- [3] Chong C. "Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges". 2003, miembro IEEE. Artículo invitado. <http://www.ics.uci.edu/~dsm/ics280sensor/readings/intro/chong.pdf>
- [4] Azami M. et Al. "Increasing the network life time by simulated annealing algorithm in WSN with point coverage". *Online* <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1305/1305.2966.pdf>
- [5] Ramadass Y. K., Chandrakasan A. P. "An Efficient Piezoelectric Energy Harvesting Interface Circuit Using a Bias-Flip Rectifier and Shared Inductor". *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2010, vol. 45, no. 1, pp.189-204.
- [6] Bonnabel A., Charentenay Y. "Energy harvesting market will approach \$250M in five years, with fastest growth from thin film thermal technologies" 2012, Yole. 12, pp 22-24. http://www.yole.fr/iso_upload/Mag/ACMEMStrendsOct%202013.pdf
- [7] Ferrari M. et Al. "An autonomous battery-less sensor module powered by piezoelectric energy harvesting with RF transmission of multiple measurement signals". 2009 *Online* <http://www.stacks.iop.org/SMS/18/085023>
- [8] Papotto G. "Batteryless rf transceiver for wireless sensor networks". 2011, Tesis Doctoral. Università degli studi di Catania.
- [9] Página web de la empresa Enocean (29/05/2014), <http://www.enocean.com/en/home/>
- [10] Página web de la empresa Algra (29/05/2014), <http://sep-touch.org/partners/algra/>
- [11] Paper de la empresa Silicon Labs. "The Energy Harvesting Tipping Point for Wireless Sensor Applications" <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/Energy-Harvesting-Solution-WP.pdf>
- [12] Yang J., Chen J., Yang Y., Zhang H., Yang W., Bai P., Su Y. and Wang Z. L. "Broadband Vibrational Energy Harvesting Based on a Triboelectric Nanogenerator". 2013, *Adv. Energy Mater*, vol 4, no. 6 doi: <http://dx.doi.org/10.1002/aenm.201301322>.
- [13] Chauhan A., Patel S., Vats G. and Vaish R. "Enhanced Thermal Energy Harvesting Using Li, K-Doped Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃ Lead-Free Ferroelectric Ceramics". 2014, *Energy Technology*, 2: pp 205-209. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/ente.201300138>.
- [14] Bridelall R. and Hande A. "Novel RFID Technologies: Energy Harvesting for Self-Powered Autonomous RFID Systems, in RFID Systems: Research Trends and Challenges", John Wiley & Sons, Ltd, 2010 Chichester, UK. Capítulo 18. Doi: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470665251.ch18>.
- [15] LTC3588-1 - Piezoelectric Energy Harvesting Power Supply <http://www.linear.com/product/LTC3588-1>
- [16] MSP430x4xx Family User's Guide <http://focus.ti.com/lit/ug/slau056j/slau056j.pdf>
- [17] CC2500 low-cost low-power 2.4 GHz RF Transceiver <http://focus.ti.com/lit/ds/swrs040c/swrs040c.pdf>
- [18] CC1100/CC2500 - Wake-On-Radio <http://focus.ti.com/lit/an/swra126b/swra126b.pdf>
- [19] MSP430x2xx Family User's Guide <http://focus.ti.com/lit/ug/slau144h/slau144h.pdf>
- [20] MSP430 IAR Embedded Workbench IDE User Guide for Texas Instruments' MSP430 Microcontroller Family <http://www.hep.princeton.edu/~marlow/rrs/Guides/Workbench.pdf>
- [21] Kellogg B., Talla V., Gollakota S., "Bringing Gesture Recognition To All Devices" 2014, *NSDI*. <http://allsee.cs.washington.edu/files/allsee.pdf>