



Trabajo Fin de Máster

ENERGY HARVESTING: ESTADO DEL ARTE Y DISEÑO DE UN SENSOR DE TEMPERATURA INALÁMBRICO ALIMENTADO POR ENERGÍA FOTOELÉCTRICA CON SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE APOYO POR RADIOFRECUENCIA

Alumno: Javier Catalán López

Tutor: Armando Roy Yarza

Empresa: Pariver

Máster en Ingeniería Electrónica
21 de Noviembre de 2011

ENERGY HARVESTING: ESTADO DEL ARTE Y DISEÑO DE UN SENSOR DE TEMPERATURA INALÁMBRICO ALIMENTADO POR ENERGÍA FOTOELÉCTRICA CON SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE APOYO POR RADIOFRECUENCIA

RESUMEN

El concepto de “*Energy Harvesting*” se refiere al proceso mediante el cual la energía que se encuentra en el ambiente es convertida en electricidad para alimentar pequeños dispositivos autónomos haciéndolos autosuficientes.

El trabajo a realizar se dividirá en dos partes: una teórica y otra práctica.

La parte teórica consistirá en un pequeño estado del arte sobre las actuales formas de recolectar energía del medio ambiente enfocado únicamente hacia la alimentación de sensores. Se hará una aproximación a cada una de las tecnologías con sus posibles aplicaciones, las soluciones comerciales disponibles, los avances más novedosos y los kits de evaluación disponibles en la actualidad. También se analizarán las diferentes opciones que existen para el almacenamiento de esa energía, los microcontroladores de ultra baja potencia disponibles y las tecnologías de transmisión de información por radiofrecuencia de baja potencia.

La parte práctica consistirá en la experimentación con dos kits de evaluación de *Energy Harvesting*: uno de captación de energía por radiofrecuencia y otro de energía fotovoltaica.

Finalmente se combinarán los dos kits de evaluación en un único dispositivo cuya funcionalidad sea la de un sensor de temperatura inalámbrico con un sistema de alimentación inteligente. Este sistema consistirá en que el sensor recargue su batería principalmente mediante una célula fotovoltaica y que en el caso de la carga de la batería baje de un límite, se active un mecanismo de emisión de energía por radiofrecuencia que pueda ser utilizada por el sensor para recargarse.

Este trabajo fin de máster se ha realizado gracias a la beca de “cheque tecnológico” obtenido por la empresa Pariver.

Índice

RESUMEN	1
ÍNDICE.....	3
INTRODUCCIÓN	5
Objetivos.....	5
División del trabajo:.....	5
ESTADO DEL ARTE.....	7
1. INTRODUCCION	7
Un mercado con futuro	7
2. TIPOS DE ENERGIAS	7
a. <i>Energía cinética</i>	8
Principio de funcionamiento:	8
Tipos de vibraciones:	8
Materiales:.....	8
Soluciones comerciales:.....	9
Kits de evaluación:.....	10
b. <i>Energía fotovoltaica</i>	10
Principio de funcionamiento:	10
Tipos de materiales:	11
Investigación:.....	11
Kits de evaluación:.....	12
c. <i>Energía térmica</i> :.....	13
Principio de funcionamiento:	13
Fabricación:	13
Soluciones comerciales:.....	13
Investigacion:.....	14
Kits de evaluación:.....	14
d. <i>Radio frecuencia</i>	15
Principio de funcionamiento:	15
Modos de funcionamiento:	15
Antena de banda ancha:.....	15
Antena de frecuencia específica:.....	16
Antena de frecuencia específica con generador de potencia:.....	16
Kits de evaluación:.....	17
3. DISPOSITIVOS DE ULTRA BAJA POTENCIA.....	18
4. ALMACENADO DE ENERGÍA.....	19
Baterías de lámina delgada:	19
Super-condensadores:.....	19
5. TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN POR RADIOFRECUENCIA.....	19
Bluetooth Low Energy	20
ANT	20
Zigbee	20
Otros protocolos propietarios	20
6. RESUMEN	21
EXPERIMENTACIÓN	23
1. INTRODUCCIÓN	23
¿Por qué estos kits concretamente?	23
Objetivo:	23
2. KIT DE RADIOFRECUENCIA	24
El Software.....	25
Funcionamiento:.....	25
Circuito integrado P2110	25
Pruebas realizadas.....	26
3. KIT DE ENERGÍA SOLAR	27

La tarjeta EnerChip EH CBC5300.....	28
Pruebas realizadas.....	29
DISPOSITIVO	31
1. INTRODUCCIÓN	31
2. PUNTO DE PARTIDA	31
Kit de energía solar:.....	31
Kit de radiofrecuencia:.....	32
3. IDEA INICIAL.....	32
4. CONTROL DE LA ALIMENTACIÓN	33
5. PASOS REALIZADOS	34
Caracterización de la batería	34
Software de control	35
Circuito de control de alimentación	36
Detección de los paquetes de energía.....	36
Algoritmo de decisión de energía suficiente	36
Comprobación de distancias.....	37
6. CONEXIÓN DE LA CÉLULA SOLAR Y EL RECEPTOR RF EN LA ENTRADAD DE CORRIENTE	37
7. PUREBA DE CAMPO	38
CONCLUSIÓN	39
GLOSARIO.....	41
BIBLIOGRAFIA.....	43
ANEXOS	47
1. DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN	47
Tarjeta XLP16: Punto de acceso en el kit RF	47
Tarjeta de sensores: Nodo en el kit RF	48
Tarjeta eZ430-2500: Punto de acceso en el kit Solar	49
Tarjeta eZ430-2500: Nodo en el kit Solar	50
2. IMÁGENES DESCRIPTIVAS.....	51
Tarjeta de sensores: Nodo en el kit RF	51
Antenas.....	51
Tarjeta de recolección RF: P2110-EVAL	52
Tarjeta XLP16 development board + tarjeta PICtail: Punto de acceso en el kit RF	52
Emisor de Potencia de RF	53
Tarjeta eZ430-2500 + USB debugger: Punto de acceso en el kit Solar	53
Tarjeta recolector solar + Tarjeta eZ430+2500: Nodo en el kit Solar	53
3. DATOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON EL KIT RF	54
Cálculo mediante la ecuación del datasheet (ecu 1):	54
Observación en el osciloscopio del consumo del LED:	54
Observación en el osciloscopio del consumo de una resistencia de 100Ω:	54
Zona de ensayos:	54
4. ELECCIÓN DEL PIN DE PROPOSITO GENERAL PARA EL CONTROL DEL RELÉ	56
5. DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE LA ALIMENTACIÓN DEL EMISOR DE RADIOFRECUENCIA.....	56
6. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA POR MODO DE FUNCIONAMIENTO	58
7. MANUAL DE INSTALACIÓN Y USO	58

Introducción

Este trabajo de fin de máster corresponde al máster de ingeniería electrónica impartido por la universidad de Zaragoza en el curso 2010-2011. Se ha realizado mediante la beca de la DGA llamada “cheque tecnológico” solicitado por la empresa Pariver.

Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Redacción de un pequeño estado del arte sobre las tecnologías disponibles para la alimentación de sensores inalámbricos.
- Análisis de las soluciones comerciales y kits de evaluación de la actualidad.
- Adquisición de uno o varios kits de evaluación para experimentar con sus posibilidades.
- Diseño y fabricación de un dispositivo novedoso a partir de los kits de evaluación adquiridos.

División del trabajo:

El trabajo se ha dividido en 3 partes:

- **Estado del arte:** El objetivo de este estado del arte es el de proporcionar a la empresa Pariver la suficiente información sobre el mercado del “energy harvesting” para que puedan tener una visión global en el caso de decidir emprender un proyecto relacionado con este tipo de tecnología. No se pretende realizar un estado del arte al uso, si no una documentación orientativa sin profundizar en los aspectos técnicos. Se hará referencia a los kits de evaluación comerciales disponibles en la actualidad para cada tecnología y se hará una comparación de ellos para elegir los dos kits más interesantes con los cuales se trabajará en la parte experimental.
- **Experimentación:** Se analizarán los kits de evaluación adquiridos, se describirán todas sus funcionalidades y se comprobará el alcance de su funcionamiento mediante una serie de pruebas básicas.
- **Dispositivo:** Se diseñará un dispositivo inteligente mediante la combinación de los dos kits de evaluación. Este dispositivo se instalará en las oficinas de Pariver donde se realizará una prueba de campo. Se elaborará la documentación de uso necesaria para ser presentado como un producto comercial aunque en realidad sea un primer prototipo funcional.

Estado del arte

1. INTRODUCCION

El concepto de “*energy harvesting*” se refiere al proceso mediante el cual la energía que se encuentra en el ambiente es convertida en electricidad para alimentar pequeños dispositivos haciéndolos autosuficientes.

Las energías llamadas “renovables” se han estado explotando durante los últimos siglos a través de molinos de viento, molinos de agua, sistemas de calentamiento por incidencia de los rayos solares, etc. En las últimas décadas los aerogeneradores y placas solares han surgido como ayuda a la generación de energía eléctrica que demanda la sociedad, abriendo una amplia vía de investigación sobre la captación de energía del entorno. Ésta tecnología aplicada a los sistemas alimentados por baterías supondría dos grandes ventajas: una vida del dispositivo prácticamente ilimitada y una eliminación de las baterías con sus problemas de mantenimiento y sus efectos nocivos para el medio ambiente.

Un mercado con futuro

El grupo de investigadores *IDTechEx* calcula que en 2011 se gastarán 0.7 Billones de dólares en *energy harvesting* pero el crecimiento se apreciará todavía más a lo largo de la década cuando en 2021 se inviertan 4.4 Billones de dólares y su mayor parte sea destinada a electrónica de consumo [1].

El objetivo de este documento es el de describir el marco tecnológico en el que se encuentra la recolección de energía del medio, enfocada a la alimentación de sensores inalámbricos (*Micro-energy harvesting*) dejando aparte las tecnologías conocidas como energías renovables (*Macro-energy harvesting*) cuyo propósito y características son totalmente diferentes.

2. TIPOS DE ENERGIAS

Las tipos de energías renovables se encuentran a nuestro alrededor en mayor medida son la de energía térmica, solar y eólica. Sin embargo existen otros tipos de energías que se pueden captar en mucha menor medida pero que pueden ser interesantes para alimentar dispositivos de muy bajo consumo. Las habituales fuentes de *energy harvesting* son las siguientes:

- Vibraciones (energía mecánica).
- Calor (energía térmica).
- Luz (energía fotoeléctrica).
- Radio frecuencia (energía inductiva).

La cantidad de energía aproximada que se puede extraer por estos medios la podemos comparar en la (**Tabla 1**).

Estos tipos de energía tienen ciertos inconvenientes como por ejemplo: suelen ser intermitentes, no reguladas y se encuentran en pequeñas cantidades.

Tipo de energía	Fuente de energía	Energía recolectada
Vibraciones	Humano	4 μ W/cm ²
	Industria	100 μ W/cm ²
Calor (diferencia de temperatura)	Humano	25 μ W/cm ²
	Industria	1-10mW/cm ²
Luz	Interior	10 μ W/cm ²
	Exterior	10mW/cm ²
Radio frecuencia	GSM	0.1 μ W/cm ²
	Wi-Fi	1 μ W/cm ²

Tabla 1.- Cantidad de energía extraíble por cada tipo [2]

a. Energía cinética

Los sistemas comerciales de captación de energía cinética pueden producir hasta 100 μ W de potencia por cm². Normalmente, la energía es generada por la flexión de un material piezoelectrico por parte de una masa situada en un extremo del mismo. La masa oscilante tiene el efecto de amplificar la potencia de la vibración.

Principio de funcionamiento:

La piezoelectricidad (etimológicamente de presión y electricidad) es una propiedad de cierta clase de materiales cristalinos en los que se incluyen cristales naturales y cerámicas manufacturadas. Cuando se les aplica presión mecánica, la estructura cristalina produce un voltaje proporcional a la presión. De la misma manera, si se le aplica un voltaje a un material piezoelectrico se estira o se encoje en la dirección del voltaje aplicado. El efecto es reversible completamente, es decir, no se deforman.

Al someter a un material piezoelectrico a una vibración, éste genera una diferencia de potencial en forma de onda senoidal con una amplitud proporcional a la fuerza de la vibración.

Tipos de vibraciones:

Diferenciamos entre 3 tipos de vibraciones en función de su origen:

- **Industria:** En estas aplicaciones pueden aprovecharse de la “frecuencia conocida” de las vibraciones ya que los motores AC producen vibraciones derivadas de los harmónicos de la frecuencia de la corriente (50 Hz en Europa y 60 Hz en EEUU). Incluye: motores, compresores, turbinas, bombas, transformadores, ventiladores, etc.
- **Estructuras:** Tienden a tener vibraciones de baja amplitud. Suelen ser las más difíciles de utilizar para alimentar baterías y regular alimentación de dispositivos. Incluyen: puentes, carreteras, sistemas de HVAC, etc.
- **Vehículos:** En este tipo de aplicaciones tienden a tener vibraciones aleatorias. Incluyen: trenes, camiones, automóviles, helicópteros, aviones, aeronaves, etc.

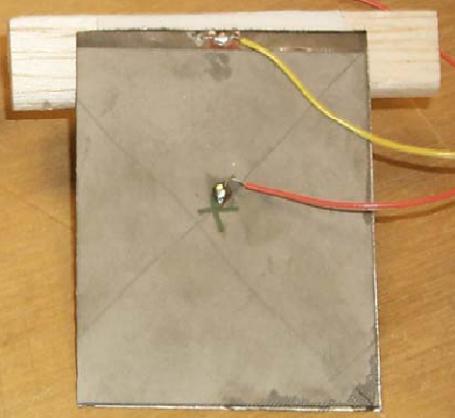
Materiales:

Existen cuatro tipos de generadores piezoelectricos en función del material del que están fabricados:

- **Piezocerámicos monolíticos (PZT)(Fig 1):** Es el actuador piezocerámico más simple que existe. Consiste en una lámina de circonato-titanato de plomo y debido a su fragilidad

no resulta duradero aunque su eficiencia es alta a cualquier frecuencia. A partir de éstos se desarrollaron los demás tipos de generadores piezocerámicos [3]. Existen principalmente dos tipos de PZTs: el 5A1 (llamado blando, alta eficiencia pero alta degradación con el uso) y el SP4 (llamado duro, menor eficiencia pero mucho más duradero) [4].

- **Quick Pack (QP)(Fig 2):** Consiste en unas tiras de piezocerámico monolítico insertadas en un material flexible. La configuración de las tiras consiguen una máxima eficiencia a una frecuencia definida por la geometría de los piezocerámicos.
- **Compuesto de macrofibra (MFC)(Fig 3):** Fue desarrollado por el centro de investigación de Langley de la NASA. El actuador MFC se construye usando fibras piezoelectricas (**Fig 4**) en forma de electrodo cruzado en un material flexible proporcionando una alta flexibilidad y robustez. No alcanza la eficiencia del piezocerámico monolítico pero su comportamiento ante vibraciones de frecuencia constante es alto [5]. Existen dos tipos de compuestos de macrofibra en función de la disposición geométrica de sus componentes: el MFC P1 y el P2 (más indicado para *energy harvesting*) [4].

	
Fig 1.- Piezocerámico monolítico [3]	Fig 2.- Generador Quick Pack [6]
	
Fig 3.- Generador MFC [3]	Fig 4.-Fibra piezoelectrica [7]

Soluciones comerciales:

Actualmente, los fabricantes de materiales piezoelectricos para *energy harvesting* tienden a proponer 3 tipos de soluciones comerciales:

- Generadores piezoelectricos diseñados para resonar a una frecuencia fija.
- Generadores piezoelectricos diseñados para aprovechar las vibraciones aleatorias que se producen a bajas frecuencias.

- Generadores piezoeléctricos diseñados a medida del cliente, que pueden comprender un ancho de banda frecuencial adaptado a la naturaleza y el entorno de la vibración.

Kits de evaluación:

No existe ningún tipo de kit de evaluación para generadores piezoeléctricos debido a que no es posible crear una solución genérica que pueda permitir experimentar con diferentes tipos de piezoeléctricos o diferentes vibraciones.

Si se desea estudiar una posible aplicación de un generador piezoeléctrico lo primero que se debe hacer es conocer el tipo de vibración que vamos a utilizar como fuente de energía. Esto lo podremos hacer con el monitor de vibraciones que nos ofrece el fabricante MIDE [6]. Consiste en un dispositivo USB con un acelerómetro de precisión alimentado por batería que podemos colocar en la fuente de vibración y registrar todas las vibraciones que ocurren. Una vez tomados los datos se descargan en un ordenador y a partir de ellos se diseña el generador piezoeléctrico a medida.

Una vez conocida la potencia y la frecuencia de la vibración se puede reproducir en el laboratorio mediante un motor generador de vibraciones y diseñar un generador piezoeléctrico a medida.

El tipo de piezoeléctrico más conveniente para un dispositivo de *energy harvesting* será el compuesto de macrofibra por ser el más avanzado. Las características que se deberán definir son:

- Tamaño del piezoeléctrico.
- Material piezoeléctrico de las macrofibra (blando o duro).
- Geometría de las macrofibra (P1 o P2).
- Tamaño de la masa oscilante.

Por último, la onda de tensión generada por un piezoeléctrico es senoidal, por lo que habrá que rectificarla y adecuarla una tensión constante. Esto se puede hacer mediante un solo integrado como el que fabrica *Linear Technology* [8] que se encarga de la rectificación, conversión DC/DC y regulación de la tensión en la salida.

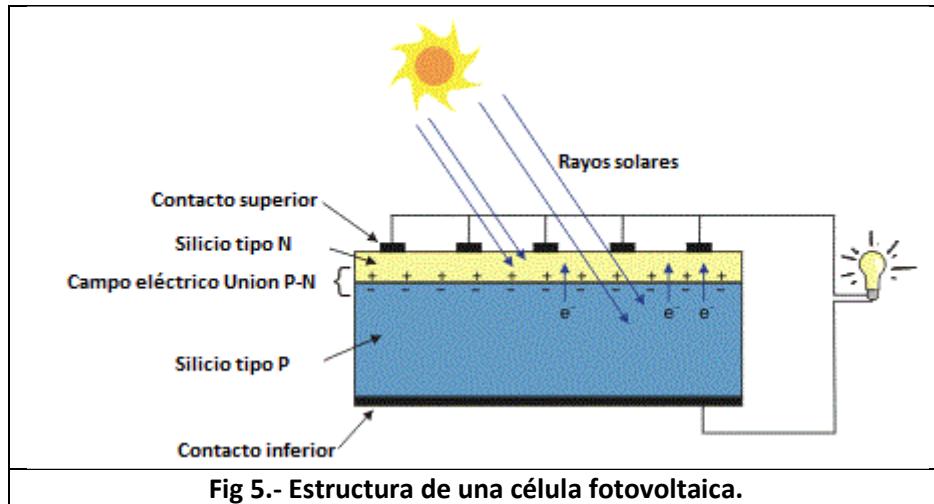
b. Energía fotovoltaica

Es una de las formas de recolección de energía más desarrolladas y utilizadas en los últimos años. Su modo de explotación y su rendimiento están bien caracterizados: aproximadamente 1 mW de potencia media puede ser recolectada por cada célula fotovoltaica de 100 mm². Su eficiencia típica está entre el 10 y el 20 % de la energía emitida por el sol. Tienen una vida útil a máximo rendimiento de unos 25 años, periodo a partir del cual la potencia entregada disminuye.

Principio de funcionamiento:

El efecto fotovoltaico deriva directamente del efecto fotoeléctrico que consiste en que si un material es expuesto a suficiente energía lumínica despiden electrones. En el caso de la energía fotovoltaica, un semiconductor expuesto a la luz, arranca un electrón creando al pasar un hueco. Normalmente, el electrón encuentra rápidamente un hueco para volver a llenarlo disipando energía. El principio de funcionamiento de una célula fotovoltaica es obligar a los electrones y a los huecos a desplazarse hacia el lado opuesto de la unión P-N, en lugar de

simplemente recombinarse, debido a la diferencia de potencial en la unión. De esta manera, al conectar una carga entre los extremos de la unión se genera una corriente eléctrica proporcional a la luz incidente (**Fig5**).



Tipos de materiales:

Existen 5 tipos células fotovoltaicas en función del tipo de material del que están fabricadas:

- **Monocristalinas:** Usan un único trozo de silicio cristalino producido en una gran lámina cortada al tamaño del panel. Las tiras metálicas se deposita a lo largo de toda la célula y funcionan como conductor que captura electrones. Su rendimiento es alto (20%) pero también su coste.
- **Paneles de lámina delgada:** A diferencia del resto de tipos de paneles solares, éste no se fabrica a partir de obleas de silicio, sino que tiene un proceso de fabricación mucho más complejo. Su coste es mayor que el de los paneles cristalinos y su eficiencia algo menor. La ventaja de estos paneles es que son muy finos y ligeros, además de ser robustos, lo que los hace ideales para ser utilizados en el sector de la construcción.
- **Policristalinas:** Utilizan gran cantidad de partículas cristalizadas de silicio. Su rendimiento es más bajo que las monocristalinas (10%) pero su coste es inferior.
- **Silicio amorfo:** Se basan en silicio sin cristalizar y se utilizan para pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes, etc.). Su rendimiento es menor del 10%.
- **Arseniuro de Galio:** Es el tipo de unión más eficiente pero su fabricación resulta muy costosa. Recientemente se ha conseguido batir el record de eficiencia de células solares de una sola unión en el laboratorio solar de la empresa *Alta Devices* en California, consiguiendo una eficiencia de 28.2 % [9].

Investigación:

Una de las investigaciones más prometedoras sobre células fotovoltaicas consiste en la fabricación de células transparentes que permitan recolectar la energía luz solar además de dejarla pasar. El *Instituto de Tecnología de Massachusetts* (MIT) está desarrollando unas células fotovoltaicas basadas en moléculas orgánicas que aprovechan la luz infrarroja para generar electricidad mientras dejan pasar la luz visible a través de ellas. Por ahora, la eficiencia de estas células es muy baja comparada con las no translúcidas aunque esperan llegar a un 12% de eficiencia [10].

En otra línea de investigación, el MIT ha desarrollado una nueva forma de conversión fotovoltaica que solo necesita de calor y no de luz solar. La clave está en un material cristalino

con miles de huecos a escala nanométrica que hacen que la energía calorífica transmitida radie energía en una longitud de onda ajustada a la aprovechable por un fotodiodo o célula solar [11].

En cuestión de eficiencia, los mayores logros se han obtenido con un tipo de células fotovoltaicas llamadas “de varias uniones” que consiste en superponer varias uniones P-N cada una ajustada para aprovechar una longitud de onda diferente de manera que se cubra el mayor espectro de energía posible de la luz solar. Con este tipo de células solares, en el *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems* (ISE) han conseguido un 41.1 % de eficiencia en una pequeña célula de 5 mm². Las tres uniones utilizadas son: GaLnP, GaLnAs y Ge [12].

Kits de evaluación:

Actualmente existen dos kits de evaluación para *energy harvesting* de energía fotovoltaica:

- Kit de energía solar de *Texas Instruments*: MSP430 Solar Energy Harvesting Development Tool [13].
- Kit de energía solar de *Silabs*: Energy Harvesting with Wireless Sensor Node [14].

Ambos tienen características muy similares y presentan las mismas funcionalidades:

- Posibilidad de conectar otros generadores (termoeléctricos, piezoeléctricos u otras células fotovoltaicas).
- Almacenamiento de energía en baterías de lámina delgada.
- Célula fotovoltaica optimizada para luz artificial.
- Microcontrolador con sensor de temperatura de ultra-bajo consumo.
- Transceptor de radiofrecuencia de bajo consumo.

Las diferencias entre los dos kits se encuentran reflejadas en la (**Tabla 2**).

Fabricante del kit		Texas instruments	Sylicon labs
Batería	Corriente (μAh)	100	700
	Dispositivo	Dos integrados EnerChip CBC050 de 50 μAh cada uno(Cymbet)	Una batería de lámina delgada de Inifinite Power Solutions (ISP)
	Vida de la batería	500-5000 ciclos de carga	Más de 15 años
	Tensión	4.1 V	4.7 V
MCU + Transceiver	Modelo	MSP430F2274 + CC2500	Si1012 (basado en el 8051)
	Frecuencia de transmisión	2.4 Ghz	919.84 Mhz
	Distancia	50 m	30-100 m
	Frecuencia de trabajo	16 Mhz	25 Mhz
	Consumo en standby	700 nA	800 nA
	Consumo en activo	250 uA/MIPs	260 uA/MIPs
Célula solar	Tamaño	64x64 mm	50x50 mm
	Fabricante	No especificado	Sanyo
Disponible desde		Enero 2009	Octubre 2011

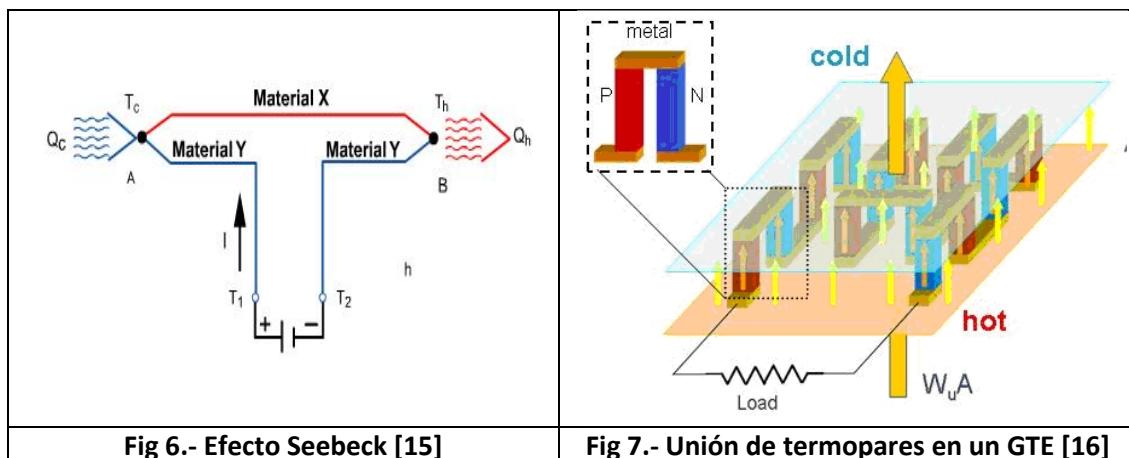
Tabla 2.- Comparación entre kits de evaluación de energía fotovoltaica [13] [14]

c. Energía térmica:

La energía térmica es una de las fuentes de energía renovable que más se está investigando actualmente debido a que produce electricidad aprovechando la energía calorífica que se disipa. En nuestro entorno encontramos todo tipo de sistemas en los que la mayoría de energía no aprovechada se disipa en forma de calor, comenzando por el propio cuerpo humano.

Principio de funcionamiento:

La energía térmica se aprovecha del efecto *Seebeck* (Fig 6), que establece que en presencia de una diferencia de temperatura entre las uniones de dos metales o semiconductores diferentes se genera un cierto potencial eléctrico. A esta unión de dos metales se le llama termopar. Un generador termo-eléctrico (GTE) se basa en la unión de varios termopares en serie y en paralelo. La potencia generada depende del tamaño del generador termo-eléctrico, de la temperatura ambiente y (en el caso de recolectar el calor de un ser humano) del nivel de actividad del metabolismo.

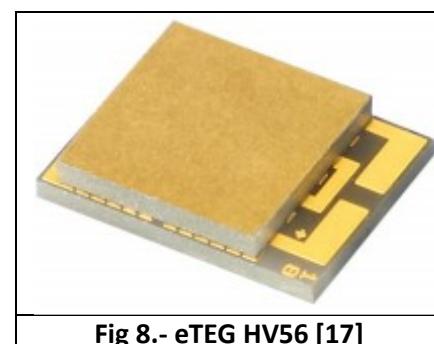


Fabricación:

Para conseguir más eficiencia y un mayor nivel de integración se utilizan semiconductores N y P en lugar de metales para construir cada termopar. Los semiconductores unidos convenientemente se colocan entre dos láminas de cerámica a modo de sandwich (Fig 7). Generalmente, a la superficie fría se le unirá un dissipador mientras que la zona caliente estará en contacto con la fuente de calor a aprovechar.

Soluciones comerciales:

El fabricante *Nexerme Thermal Solution* [17] ha anunciado el nuevo generador termoeléctrico eTEG™ HV56 (Fig 8) que es capaz de producir 1.5 mW de potencia y un voltaje de circuito abierto de 250 mV a una diferencia de temperatura de 10 K. A 50 K de diferencia produce 36.5 mW y un voltaje de circuito abierto de 1.25 V. Este módulo ocupa un espacio de 11 mm² y es extremadamente fino (0.6 mm). Puede configurarse en serie para conseguir mayores voltajes y potencias de salida.



Investigacion:

El sector automovilístico esta invirtiendo en desarrollar esta tecnología para aprovechar el calor de los gases expulsados por el motor y mejorar el rendimiento del combustible. Estos gases contienen alrededor del 40 % de la energía generada en la combustión y salen a una temperatura de unos 700 °C lo cual es un reto para el diseño del generador termoeléctrico ya que los actuales no estan preparados para soportar tales temperaturas. Los primeros tests que han realizado en *General Motors* [18] demuestran que pueden mejorar la eficiencia del combustible en un 3 % y esperan llegar hasta el 10 % cuando consigan aprovechar al máximo las altas temperaturas de los gases. Está previsto que en 2012 se comiencen a comercializar los conocidos como ATEGs (*Automobile Thermo Electric Generators*) [19].

En los laboratorios de *Fujitsu* [20] están desarrollando un generador híbrido capaz de captar energía tanto de la luz como de la diferencia de temperatura (**Fig 9**). Su origen es orgánico, por lo que su fabricación no será muy costosa y tendrá un gran potencial para aplicaciones biomédicas y de predicción meteorológica.

El dispositivo consiste en varias láminas de semiconductores P y N que según el circuito de conexión actuarán como célula fotovoltaica o como generador termoeléctrico (**Fig 10**).

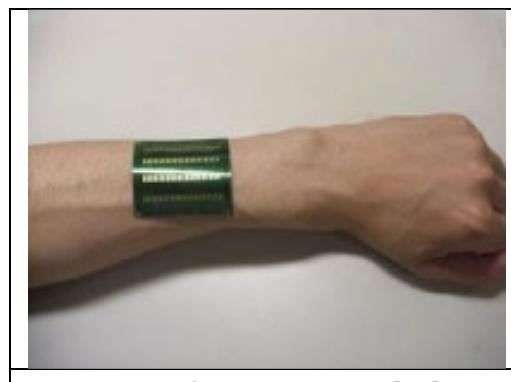


Fig 9.- Célula termosolar [20]

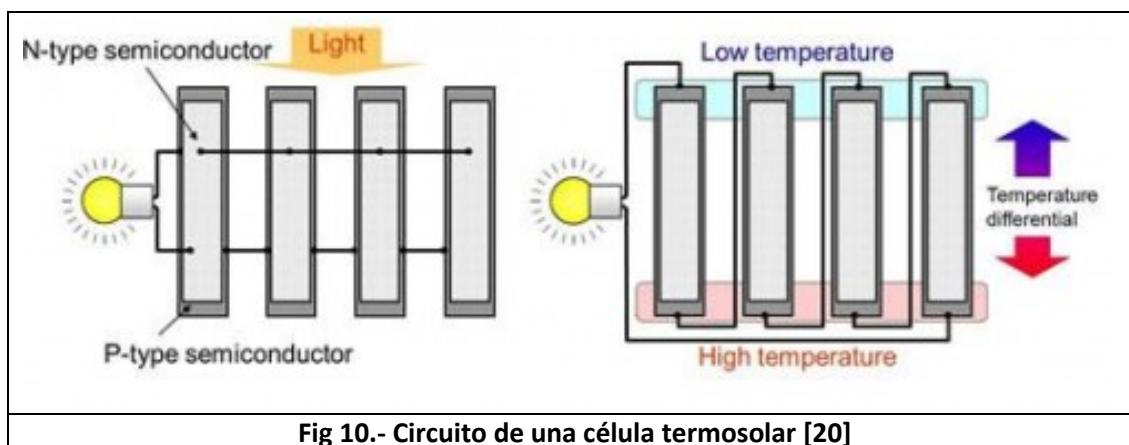


Fig 10.- Circuito de una célula termosolar [20]

Esperan comenzar a comercializar esta tecnología a partir de 2015.

Kits de evaluación:

Estos son los kits de evaluación de energía termoeléctrica disponibles en la actualidad:

- **Nexterme therma solutions thermobility WPG-1:** está basado en el generador termoeléctrico eTEG HV56 comentado anteriormente. El kit consta de un generador termoeléctrico unido a un disipador y una tarjeta que se encarga de regular la tensión con distintas opciones (3.3, 4.1, o 5 V) y ofrecerla a un microcontrolador a través de unos conectores. Uno de ellos es el que utiliza la tarjeta de evaluación de *Texas Instruments* eZ430. Está disponible desde Abril de 2011 [21].
- **Micropelt TE-Power NODE Evaluation kit for Thermal Energy Harvesting:** está basado en el generador termoeléctrico MPG-D751 de *Micropelt*. El kit consta de varias tarjetas

intercambiables, para elegir entre diferentes aplicaciones y diferentes tipos de alimentación. Entre las aplicaciones disponibles incluye una para sensores inalámbricos (a través del microcontrolador MSP340 y el transceptor de radiofrecuencia CC2500 a 2.4 GHz de *Texas Instruments*). La tarjeta principal incluye el GTE, un dissipador en el lado frío, una superficie de contacto para el lado caliente y unos conectores para unir otras tarjetas. Está disponible desde Octubre de 2011 [22].

d. Radio frecuencia

La radiofrecuencia es cualquier tipo de onda electromagnética dentro del rango entre los 3 KHz y los 300 GHz. Con el avance de las telecomunicaciones, nos encontramos cada vez más rodeados de radiofrecuencia generada por las estaciones emisoras de señales de televisión, radio, satélite, redes móviles, *Wi-Fi*, etc. La energía en forma de radiofrecuencia que existe en el ambiente es tan pequeña que hasta ahora solo ha servido para transmitir información, pero se está investigando la forma de alimentar dispositivos a través de ella.

Principio de funcionamiento:

Llamamos onda electromagnética a la forma de propagación de la radiación electromagnética. Ésta radiación se produce al aplicarle una tensión variable a una antena. El cambio de voltaje y la circulación de corriente producen un campo electromagnético que se propaga por el aire transportando la energía que al ser captada por otra antena, genera corriente en el dispositivo receptor. La radiofrecuencia se propaga por el aire a la velocidad de la luz, de la misma manera que cualquier radiación electromagnética, pero su intensidad se reduce con el cuadrado de la distancia que recorre. Es por esto que la eficiencia de estos sistemas suele ser muy baja.

Modos de funcionamiento:

El modo de extraer energía eléctrica a partir de la radiofrecuencia del ambiente lo podemos enfocar de 3 maneras diferentes:

- A través de una antena de banda ancha para todo tipo de radiofrecuencia, intentando captar toda la energía posible en todo el espectro de frecuencias.
- Con una antena diseñada para aprovechar una frecuencia específica que se sabe que se encuentra en el entorno.
- Mediante un sistema que genere potencia en una frecuencia conocida y con una antena sintonizada.

Antena de banda ancha:

A través de una investigación del la *Georgia Tech School* [23] han logrado diseñar una antena de ultra banda ancha (**Fig 11**) que incrementa la capacidad de recolectar potencia en diferentes rangos de frecuencia. Utilizando impresoras de tinta son capaces de combinar antenas y sensores en papel o polímeros flexibles dando como resultado sensores inalámbricos autoalimentados que pueden ser usados en propósitos industriales, sanitarios, militares, etc. Utilizando el rango de frecuencias que emiten las ondas de televisión han logrado recolectar cientos de micro vatios y con un sistema multibanda esperan pasar de 1 mW de potencia recolectado. Los investigadores han conseguido hacer funcionar un sensor de temperatura utilizando la energía electromagnética emitida por una estación de televisión a medio kilómetro de distancia.

Esta forma de recolectar energía podría servir de apoyo a otras tecnologías de *energy harvesting* como por ejemplo la energía solar, continuando la recolección de energía por la noche o al menos evitando que se descarguen las baterías.

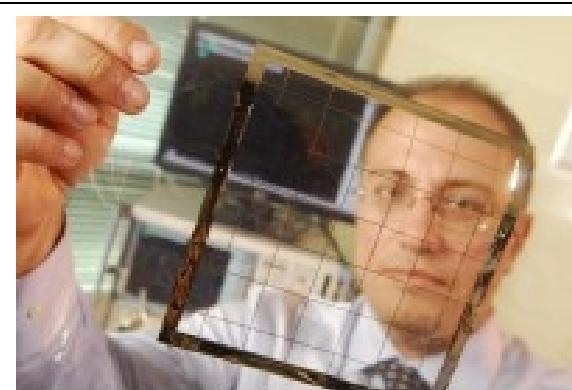


Fig 11.- Antena de ultra banda ancha [23]



Fig 12.- AirEnergy Charger de RCA [24]

Antena de frecuencia específica:

Si es conocido que en el ambiente existe una señal de radiofrecuencia de considerable potencia en un estrecho rango de frecuencia, el sistema de recolección será mucho más eficiente que si intentamos recolectar un gran rango de frecuencias. Los rangos del espectro de frecuencias más utilizados actualmente son los utilizados para telefonía móvil (900 MHz y 1800 MHz) y el utilizado por el *Wi-Fi* (2,4 GHz).

En el *International Consumer Electronics Show* (CES) de 2010, la empresa RCA presentó el *AirEnergy Charger* (Fig 12), un dispositivo que convierte la energía de la señal generada por los *router Wi-Fi* en electricidad para recargar pequeños dispositivos [24]. En la demostración, este aparato fue capaz de recargar el 70% de la batería de un teléfono móvil en 90 minutos utilizando únicamente las señales *Wi-Fi* del ambiente del congreso. El dispositivo perdía gran parte de su eficiencia al alejarse de la fuente de radiofrecuencia, pero cuenta con una batería interna para dejarlo cargando y recargar el teléfono en otro momento en cualquier otro lugar.

Antena de frecuencia específica con generador de potencia:

Aunque este sistema no se podría categorizar como una energía renovable, ya que la energía captada la estamos generando nosotros a propósito, sí que tiene sentido mencionarlo como una manera de alimentar sensores inalámbricos.

De la misma manera que en el apartado anterior se explicaba como un dispositivo aprovechaba la radiofrecuencia generada por un *router Wi-Fi*, se puede generar una onda de radiofrecuencia de la potencia que deseemos y así alimentar dispositivos de manera inalámbrica.

En 2007 los investigadores físicos del MIT demostraron la transferencia inalámbrica de potencia encendiendo una bombilla de 60 W a 2 metros de distancia de la fuente, utilizando dos bobinas de 60 cm de diámetro. La eficiencia del sistema era de un 40 % y bautizaron esta tecnología como *Witricity* (Fig 13). Actualmente el fabricante de automóviles *Toyota* ha invertido en esta tecnología para recargar sus automóviles eléctricos sin necesidad de enchufarlos [25].

	
Fig 13.- Demostración de Witricity (MIT) [25]	Fig 14.- Prototipo de sistema de transferencia de potencia inalámbrico (Sony) [26]

Por otra parte *Sony Corporation* también está desarrollando su sistema de transferencia inalámbrica de electricidad [26]. Han demostrado transferir una potencia de 60 W a una distancia de 50 cm con una eficiencia aproximadamente del 80% y del 60% cuando se incluye un rectificador. Mediante la resonancia magnética, la energía electromagnética sólo es transferida a dispositivos receptores que comparten las mismas frecuencias resonantes de la fuente de energía incluso cuando hay objetos metálicos situados entre transmisor y receptor sin que les afecte la inducción térmica. Además, *Sony* ha desarrollado también unidades expansoras pasivas que permiten extender la distancia de transferencia de 50 a 80 cm sin degradación de la eficiencia. El objetivo de esta investigación es lograr alimentar cualquier tipo de dispositivos electrónicos de una habitación (televisor, portátil, iluminación, cargar móviles, etc.) de manera inalámbrica (**Fig 14**).

Los principales beneficios de la energía transmitida por radiofrecuencia desde una fuente controlada, respecto de otras tecnologías de *energy harvesting*, aplicado a alimentar sensores inalámbricos son:

- Permite transmitir energía en la distancia.
- La energía transmitida desde un emisor puede ser aprovechada por múltiples receptores.
- La potencia transmitida es regulable.

Kits de evaluación:

La transmisión de energía por radiofrecuencia es una tecnología poco accesible debido a su alto coste y al poco conocimiento que se tiene de ella. Por esta razón no existen apenas kits de evaluación ni es posibilidades de adentrarse en materia sin tener amplios conocimientos sobre el tema.

El único fabricante que ofrece kits de evaluación para *energy harvesting* de radiofrecuencia es *Powercast*: uno enfocado hacia sensores inalámbricos y otro hacia recarga de baterías [27]:

- **Development kit for battery-less wireless sensors (P2110-EVAL-01):** Contiene un emisor de radiofrecuencia, dos receptores con dos antenas cada uno y dos tarjetas de sensores (humedad, luminosidad y temperatura).

- **Development kit for battery charging (P2110-EVAL-02):** Contiene un emisor de radiofrecuencia, un receptor con dos antenas, una tarjeta con una batería de lámina fina, una tarjeta para controlar la recarga de la batería y un kit de desarrollo ez430 de *Texas Instruments*.

3. DISPOSITIVOS DE ULTRA BAJA POTENCIA

Conforme va avanzando la tecnología se están desarrollando microprocesadores, sensores, transmisores y demás dispositivos electrónicos que pueden funcionar consumiendo cada vez menos energía. Poco a poco, han surgido ejemplos de aparatos que se alimentan exclusivamente de energía recolectada del medio, como las calculadoras solares o los relojes de pulsera alimentados por energía cinética. Pero ahora, con el desarrollo de los microcontroladores de ultra-baja potencia las posibilidades se multiplican y una de ellas son las redes de sensores inalámbricas. Para este tipo de dispositivos, generalmente se requiere una medición y un mínimo de procesamiento de datos antes del envío por radiofrecuencia de la información. Todo esto suele suceder cada cierto tiempo con un ciclo de trabajo muy bajo, debido a que la capacidad de la batería y la potencia con la que se recarga es escasa. Por ello, el microcontrolador encargado de realizar estas funciones debe ser lo más eficiente posible.

Actualmente, todos los fabricantes de circuitos integrados compiten por la fabricación del microcontrolador más adecuado para esta labor. *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*. Pero sin duda el microcontrolador más adecuado para sensores inalámbricos es el MSP430 de *Texas Instruments*, que unido al transceptor de radiofrecuencia CC2500 está siendo elegido para procesar y enviar datos por muchos kits de evaluación de *energy harvesting*. Este microcontrolador de ultra baja potencia cuenta con una gran variedad de configuraciones en cuanto a periféricos como diferentes cantidades de memoria Flash y RAM, comunicaciones (UART, SPI, I2C...), conversores ADC, *timers*, velocidades de reloj, bits de instrucciones, etc. Todo esto con un bajísimo consumo de potencia.

Por ejemplo, la serie MSP430x2xx cuenta con las características descritas en la (**Tabla 3**):

Características	Consumo	Parámetros configurables
Instrucciones de 16 bits	0.1 μ A en retención de RAM	Memoria Flash: 1 KB – 120 KB
Velocidad de proceso: 16 MIPS	0.3 μ A en modo Standby	Memoria RAM: 128 B - 8 KB
Voltaje de alimentación: 1.8 V – 3.6 V	0.7 μ A reloj de tiempo real	GPIOs: 10, 16, 24, 32, 48, 64 pines
Oscilador de baja potencia integrado (VLO)	220 μ A / MIPS en modo activo	ADCs: rampa, 10 o 12 bit SAR, 16 bit sigma delta
<1 μ s de Standby a modo activo		Comunicaciones: UART, SPI, I2C

Tabla 3.- Características del microcontrolador MSP430x2xx [28]

4. ALMACENADO DE ENERGÍA

Generalmente, la energía recolectada del medio debe ser almacenada antes de ser utilizada por los dispositivos de baja potencia debido a que suelen ser fuentes intermitentes, no controladas y, en según qué situaciones, no generan energía en absoluto.

La mejor manera de almacenar la energía, en el caso del *energy harvesting*, es mediante baterías de lámina delgada o super-condensadores. La elección de un tipo de almacenamiento u otro dependerá de las características del sistema. A continuación se detallan las propiedades de los dos tipos de almacenamiento.

Baterías de lámina delgada:

Las baterías de lámina delgada fueron desarrolladas por primera vez en *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*. El principio de funcionamiento es el mismo que las baterías convencionales, la reacción química entre ánodo y cátodo. Generalmente estas baterías se basan en el litio, lo cual les hace aguantar altas temperaturas. Sus ventajas frente a los super-condensadores son:

- Mayor densidad de energía por volumen.
- Menor auto-descarga.
- Tensión quasi-constante.

En la actualidad, cuatro fabricantes ya disponen en su catálogo de baterías de lámina fina para electrónica de consumo: *Solicore*, *Cymbet*, *Infinite Power* y *ORME* [29].

Super-condensadores:

Los condensadores siempre han sido capaces de almacenar carga pero para el uso en la electrónica convencional nunca se le ha dado importancia a la densidad ni a la capacidad de carga sino que el objetivo ha sido reducir el coste de fabricación y aumentar su durabilidad. Pero la tecnología ha avanzado y se ha conseguido fabricar condensadores con mayor densidad de energía que los convencionales, llegando hasta los 30 Wh/Kg [30].

Generalmente, estos super-condensadores están fabricados mediante doble capa electroquímica. Esto consiste en sustituir el material cerámico entre placas por un material poroso de carbono en una disolución electrolítica, produciendo un aumento en el área de las placas y por tanto en la capacidad. Sus ventajas frente a las baterías de lámina delgada son:

- Infinitos ciclos de carga y descarga sin degradación.
- No tienen problema de sobrecarga.
- El tiempo de carga y descarga es mucho más rápido debido a que no suceden reacciones químicas.

5. TRANSMISIÓN DE LA INFORMACIÓN POR RADIOFRECUENCIA

Aunque cabe la posibilidad de que el dispositivo inalámbrico cumpla todas sus funciones de manera independiente, lo más habitual es que se tenga que comunicar con otros sensores o con algún dispositivo permanentemente alimentado.

A la hora de elegir la tecnología de radiofrecuencia más adecuada se deberán tener en cuenta características como la eficiencia en potencia, la robustez de la comunicación, el alcance, el consumo, la latencia, etc. Generalmente, a la hora de diseñar un dispositivo electrónico con comunicación por radiofrecuencia se tiene a utilizar un estándar. Los estándares más interesantes para ser utilizadas en dispositivos de *energy harvesting* actualmente son: *Bluetooth Low Energy*, *ANT* y *Zigbee* [31].

Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (LE) comenzó como un proyecto en el *Nokia Reserach Center*. En 2007, esta tecnología fue adoptada por el *Bluetooth Special Interest Group* (SIG). Se le conoce también como *Bluetooth V4.0* y forma parte de la especificación pública *Bluetooth* como estándar. Un dispositivo *Bluetooth LE* envía paquetes de 20 bytes cada 500 ms, y consume 0.153 μ W/bit por un alcance de 50 m.

ANT

ANT es una tecnología inalámbrica propietaria de baja potencia que opera en el espectro de 2.4 GHz. Fue establecida en 2004 por la compañía de sensores *Dynastream*. En un principio, se diseño para comunicar sensores de salud y deportivos con dispositivos de interfaz de usuario. *ANT+* mejora el protocolo *ANT* para hacerlo interoperable con otros dispositivos en una red. Un dispositivo *ANT* configurado para transmitir a 32 Bytes/segundo consume 0.71 μ W/bit y su alcance es de unos 30 m.

Zigbee

ZigBee es una especificación de comunicación inalámbrica de baja potencia basada en el estándar 802.15.4.2003 del instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos (IEEE) y fue establecido en 2002 por un grupo de 16 compañías. Introduce las redes *Mesh* en los sensores de baja potencia. La complejidad y el consumo de potencia de esta tecnología no la hacen adecuada para dispositivos de potencia limitada. Un dispositivo *Zigbee* consume 185.9 μ W/bit con un alcance de hasta 100 m.

Otros protocolos propietarios

Algunos fabricantes deciden que ninguno de los estándares se adapta sus necesidades y diseñan su propio protocolo a medida, de manera que solamente puedan utilizarlo ellos o puedan hacer negocio con él.

Es el caso, por ejemplo, de la marca deportiva NIKE, que ha diseñado un dispositivo a baterías con acelerómetro y GPS que se inserta en la zapatilla antes de salir a correr y le envía información a un receptor o a un "iPod". La comunicación se realiza sobre la banda de 2.4 GHz sobre un protocolo propietario diseñado por NIKE a su medida [32].

Otro caso es el de los fabricantes de microcontroladores *Texas Instruments* y *Microchip* que ofrecen gratuitamente a los diseñadores que utilicen sus microcontroladores y transceptores el código para utilizar sus protocolos fácilmente. Ambos comunican en la frecuencia 2.4 GHz y sobre el estándar 802.15.4 igual que *Zigbee*, pero su complejidad es mucho menor, al igual que sus posibilidades son más reducidas. Son los siguientes:

- **MiWi:** *Microchip* [33].
- **SimpliciTI:** *Texas Instruments* [34].

6. RESUMEN

El *energy harvesting* es una rama de la electrónica en auge que va a ir creciendo en el mercado exponencialmente debido al ahorro de mantenimiento que supone y a las nuevas posibilidades que ofrece la creación dispositivos electrónicos autónomos. Todas las universidades y centros de desarrollo están realizando grandes esfuerzos en investigación científica relacionada con el *energy harvesting* y están dando sus frutos.

Las nuevas células solares son mucho más eficientes, ligeras y baratas que hace años, lo cual hace pensar que aún tienen mucho terreno por el cual expandirse, mientras que los generadores piezoelectríficos siguen estancados sin que nadie llegue a confiar realmente en ellos como generadores de energía. Mientras tanto, los generadores termoeléctricos, impulsados por el capital de la industria automovilística podrían experimentar un gran avance en los próximos años dando lugar a unos generadores de energía realmente prácticos, aunque difícilmente utilizables fuera de la industria o los automóviles. En cuanto a la captación de energía por radiofrecuencia, es un campo que aún queda mucho por investigar pero que ya está dando los primeros pasos. Si se mejora la eficiencia de la transmisión lo suficiente, en unos años podemos encontrarnos con una verdadera revolución en la electrónica: la transferencia de potencia a distancia.

Experimentación

1. INTRODUCCIÓN

Una vez conocido el estado del arte actual en cuanto a *energy harvesting*, nos disponemos a experimentar con dos de estas tecnologías con la intención de conocer sus posibilidades y limitaciones. Los kits de evaluación a probar son los siguientes:

- **P2110-EVAL-01:** Kit de evaluación de *Powercast & MicroChip* de radiofrecuencia [27].
- **ez430-R2500-SEH:** Herramienta de desarrollo de *energy harvesting* solar de *Texas Instruments* [13].

¿Por qué estos kits concretamente?

A la hora de elegir el tipo de energía a aprovechar, descartamos directamente la energía piezoeléctrica ya que los fabricantes no ofrecen kits de evaluación al uso. Dentro de los 3 restantes, la energía fotovoltaica y la de radiofrecuencia tienen mucho más sentido dentro del entorno de una oficina que la termoeléctrica. Al tener como objetivo el diseño de un dispositivo que será instalado en las oficinas de la empresa Pariver optamos por la energía fotovoltaica y la de radiofrecuencia.

La transmisión de potencia a través de la radiofrecuencia es la manera menos desarrollada de alimentar sensores inalámbricos, a pesar de su gran potencial en el campo del *energy harvesting*. La posibilidad de controlar la fuente de energía ofrece una nueva característica que no existe en el resto de tipos de *energy harvesting* por lo que resulta más interesante todavía. El hecho de que el kit incluya 3 tipos de sensores (humedad, temperatura y luminosidad) y que la forma de almacenar energía consista en un super-condensador de 50 mF son otras características que aprovecharemos de este kit de desarrollo.

Por otra parte, entre los diferentes kits de energía solar, elegimos el kit de *Texas Instruments* principalmente porque en la fecha en la que se adquirieron los kits de desarrollo, la solución de *Silabs* no estaba disponible. A pesar de ello, posee ciertas características que le hace ser un kit de evaluación más que suficiente para este trabajo. Por ejemplo, trae consigo el microcontrolador de ultra baja potencia de vanguardia (el MSP430), el panel fotovoltaico está optimizado para sacar el máximo rendimiento de la luz de interiores y el modo de almacenamiento consiste en dos baterías de lámina delgada (*EnerChip*) lo cual nos permite explorar los dos tipos de almacenamiento de energía.

Objetivo:

El objetivo de experimentar con estos kits de evaluación es dar a conocer a la empresa Pariver todas las posibilidades que éstos ofrecen, comprobar sus limitaciones y documentar su funcionamiento. Una vez conocido el funcionamiento se podrá aproximar con mayor seguridad el siguiente paso del trabajo fin de máster que consiste en la realización de un nuevo dispositivo a partir de los kits de evaluación adquiridos.

2. KIT DE RADIOFRECUENCIA

Gracias a la colaboración entre las empresas de electrónica *Powercast* y *Microchip* hemos podido adquirir el kit de evaluación P2110-EVAL-01 Lifetime Power Energy Harvesting Developement Kit for Wireless Sensors. (Fig 15)



El kit incluye (ver imágenes descriptivas en el punto 2 del anexo):

- **2 tarjetas de sensores:** Equipadas con un sensor de humedad HIH 5030, un sensor de temperatura tipo NTC, un sensor de luminosidad TEMT6000X0, un conector para un sensor externo, un microcontrolador PIC24F16KA102 y un emisor de radiofrecuencia MRF24J40MA a 2.45 Ghz bajo el estándar 802.15.4. Un microswitch de 3 interruptores permite configurar una ID única para la tarjeta.
- **2 antenas de 915MHz omnidireccionales:** Es de tipo dipolo, con una recepción de 360 grados cuando esta polarizada verticalmente. Su ganancia es de 1.25 dBi.
- **2 antenas de 915MHz direccionales:** Es una antena de tipo parche, con un ángulo de recepción de 120 grados horizontal y 62 grados en vertical cuando esta polarizada verticalmente. Su ganancia es de 4.1 dBi.
- **2 tarjetas de recolección RF:** Con un conector para la antena, un integrado P2110 de *Powercast* que convierte la energía RF en corriente continua y un super-condensador de 50mF para almacenar la energía.
- **1 tarjeta XLP16 development board + tarjeta PICtail:** Contiene un PIC24F16KA102 con conexión serie por USB para gestionar la rede de sensores. Mediante un conector se le une la tarjeta *PICtail* que le proporciona conexión con las tarjetas de sensores a través de su módulo de radiofrecuencia MRF24J40MA a 2.4GHz / 802.15.4.
- **1 emisor de potencia de RF:** Emite una onda de 3 vatios de potencia a 915 Mhz. La antena es de tipo parche (unidireccional) y tiene una ganancia de 8dBi. El dispositivo se alimenta mediante un transformador convencional de 5V y no tiene ninguna opción de control salvo la propia alimentación. El patrón de radiación esta dentro de los 60º horizontalmente y 60º verticalmente.
- **1 programador PIC it3:** Sirve para programar tanto la tarjeta XLP16 como las tarjetas de sensores.
- **Software:** El kit facilita el código de programa de ambos dispositivos (punto de acceso y nodo) así como un entorno de desarrollo con su compilador y depurador (MPLABIDE).

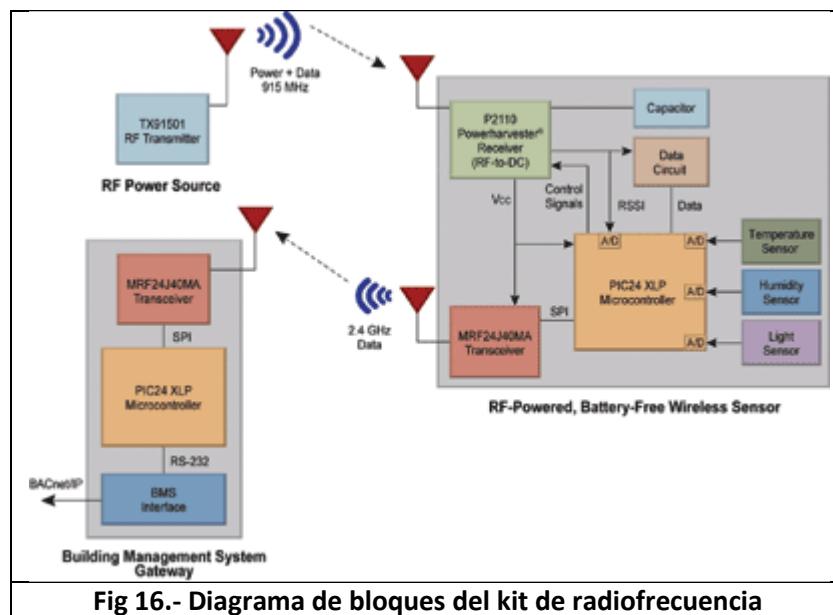
El Software

El kit viene con un software pre-programado en las tarjetas se encarga de que al conectar la tarjeta XLP16 a un ordenador, se muestre por el *hyperterminal* los paquetes enviados por los sensores. También está disponible el código de los programas en lenguaje C, de los cuales se han extraído los diagramas de flujo de programación para su mejor comprensión y su posterior modificación. Se encuentran en el punto 1 del anexo.

La comunicación por radiofrecuencia se realiza utilizando el protocolo *MiWi* que ofrece *Microchip* a los diseñadores que utilicen sus dispositivos.

Funcionamiento:

El funcionamiento del kit se puede ver explicado en el diagrama de bloques de la **Fig 16.**



El receptor tiene un interruptor que permite dar tensión a la tarjeta de sensores o a un diodo led a modo de prueba. También permite cambiar de condensador de almacenamiento entre uno de 1000 μ F y otro de 50 mF mediante unos *jumpers*.

La información que recibe el ordenador mediante comunicación serie consiste en:

- El índice del paquete recibido desde que se ha encendido el punto de acceso.
- La ID del nodo que envía el paquete.
- La ID del emisor de RF.
- El tiempo transcurrido desde que se encendió el punto de acceso.
- La potencia de la señal RF recibida por el sensor en el momento del envío.
- El tiempo transcurrido desde que ese mismo nodo envió el último paquete.
- Las medidas de los sensores.

Circuito integrado P2110

El integrado P2110 [35] es el componente principal del kit RF, se encarga de convertir la energía de la radiofrecuencia (optimizado para frecuencias entre 902 y 928 MHz) en energía DC para almacenarla en un condensador. Cuando se alcanza una carga especificada en el

condensador, el integrado eleva el voltaje hasta el nivel de tensión concreto (configurable mediante resistencias) y lo saca por el pin V_{out} en forma de tensión regulada. Conforme se va suministrando corriente por el pin V_{out} , la carga del condensador va descendiendo y cuando baja de un nivel especificado, la salida V_{out} se corta. Se puede utilizar un microprocesador para controlar el proceso de manera que si cuando la salida está activada, el pin Reset se lleva a su estado alto, se corta la alimentación hasta que el condensador vuelva a cargarse al nivel especificado. El pin Int se activa a una tensión aproximada de 1 V cuando la tensión de salida en V_{out} está disponible. El pin V_{set} sirve para ajustar el voltaje de salida (V_{out}) conectándole una resistencia. Si se deja no conectado la salida será 3,3V. D_{out} nos ofrece un valor analógico correspondiente a la potencia de la señal de energía recolectada. Para que este valor esté disponible se debe poner en estado alto el pin D_{set} . Mientras D_{set} está activado, la corriente DC recolectada pasa por una resistencia para dar el valor D_{out} , y esa energía es desaprovechada.

Características técnicas:

- La salida es regulable hasta 5,25 V.
- Hasta 50 mA de corriente de salida.
- Indicador potencia instantánea de la señal recibida.
- Opera hasta a -11.5 dBm de potencia de entrada.
- Reseteable por un microcontrolador: permite cortar la alimentación para reservar energía para el siguiente ciclo.
- Voltajes máximo y mínimo en el condensador de almacenado de carga fijos: 1.25 V y 1.02 V.

Como se puede ver, la cantidad máxima de energía que proporciona en cada ciclo corresponde a un porcentaje de la carga del condensador consecuentemente depende proporcionalmente de la capacidad del condensador. Este condensador debe tener la menor corriente de fuga posible y la resistencia interna debe ser menor de 200 mΩ. El cálculo del condensador se realiza mediante la siguiente fórmula (**Ecu 1**):

$$C = 15V_{OUT}I_{OUT}t_{on}$$

Ecu 1.- Cálculo estimado de la capacidad del condensador [35]

Pruebas realizadas

Las pruebas realizadas sobre el kit de RF se han limitado a comprobar el alcance del emisor en función de la localización de las antenas y la distancia a la que puede llegar a alcanzar el transmisor de radiofrecuencia.

Como la energía máxima disponible en cada ciclo depende de la capacidad del condensador, configuramos la placa para que almacene la energía en el condensador pequeño (1000 µF) y sin conectar la tarjeta de sensores (sólo consumirá energía el LED que está conectado a la salida de alimentación del integrado P2110). De esta manera, midiendo los tiempos entre parpadeos podemos hacernos una idea de la cantidad de potencia instantánea que se recolecta en cada situación (distancia y ángulo).

Las pruebas se van a realizar en una habitación de 5x10 metros colocando el emisor a una altura de 1 metro de la manera que se ve en el punto 3 del anexo. Las antenas estarán

colocadas verticalmente a la misma altura aproximadamente que el emisor, para que la transferencia de potencia sea la máxima. Estas son las conclusiones de la experimentación:

- La verticalidad de la antena es el factor más importante a la hora de lograr la máxima transferencia de potencia. Cada antena deberá colocarse minuciosamente con respecto del emisor si se desea conseguir transmitir potencia a largas distancias (más de 7 metros).
- La antena de tipo parche al tener más ganancia tiene mucho mayor alcance y mejor respuesta a las imprecisiones de alineación tanto en altura como en verticalidad. A pesar de ello, una antena dipolo resultará suficiente para transmitir potencia en una distancia menor de 7 metros siempre y cuando la antena se coloque adecuadamente.
- La distancia máxima alcanzable por la antena parche es de 12 metros en condiciones ideales.

Los datos experimentales obtenidos se encuentran en el punto 3 del anexo.

La energía proporcionada por el recolector en cada ciclo con el condensador de 1000 μ F es de 30 nWh, la cual es muy pequeña. Nos permite hacernos una idea del alcance que puede llegar a tener el kit pero, en realidad, si queremos que un dispositivo pueda medir alguna magnitud, procesar la información y enviarla por radiofrecuencia necesitaremos una energía mucho mayor (del orden de 10 veces mayor como mínimo). Esto significa que necesitaremos un condensador mayor y, por lo tanto, más tiempo de carga para cada ciclo, aunque la cantidad de energía por segundo captada será la misma que en las pruebas experimentales.

En cuanto a la transmisión de datos por radiofrecuencia, comprobamos que en línea recta comunican perfectamente a distancias mayores de 10 metros, pero si hay obstáculos a partir de 7 metros comienzan a perderse paquetes de información.

Por otra parte, medimos el tiempo y la corriente consumida por el sensor realizando el programa inicial y obtenemos que cantidad de energía que se necesita para hacer la función para la que se ha programado es de aproximadamente 500 nWh.

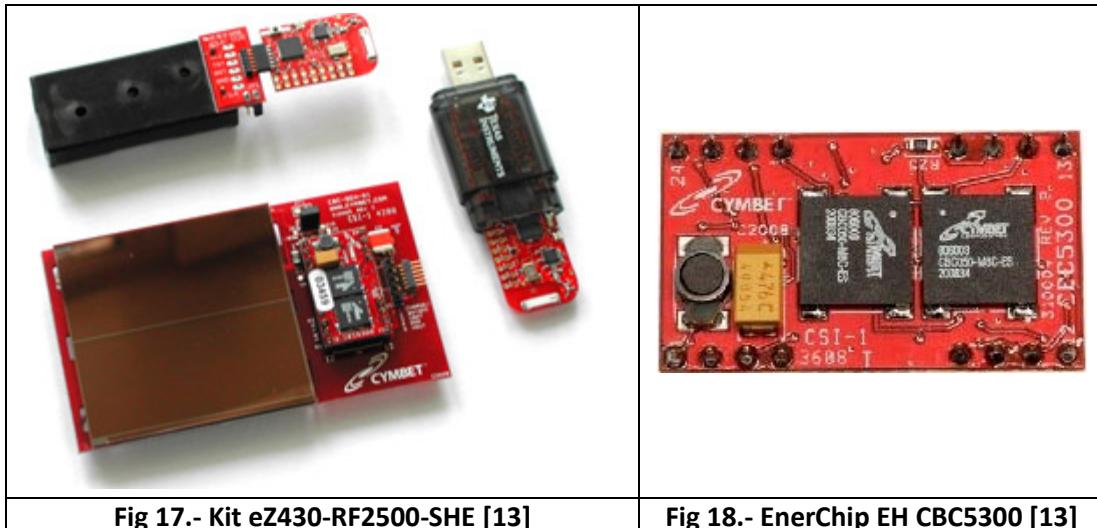
3. KIT DE ENERGÍA SOLAR

El kit eZ430-RF2500-SEH (**Fig 17**) es un kit de evaluación completo para crear una red de sensores inalámbricos alimentados perpetuamente basado en el microcontrolador de ultra-baja potencia MSP430. Incluye un panel solar de alta eficiencia optimizado para luz de interior (fluorescentes de baja intensidad). También dispone de entradas de energía externas para conectar un generador termoeléctrico, un piezoelectrico u otro panel solar. La energía recolectada se almacena en dos integrados del fabricante *Cymbet* llamados *EnerChip*, que contienen una batería de lámina delgada de 50 μ Ah cada uno.

El kit de energía solar se compone de:

- **1 recolector solar:** contiene un panel solar de 2.25x2.25" y los dos *EnerChip* de almacenamiento.
- **2 tarjetas eZ430-RF2500:** contienen el microcontrolador MSP430F2274 y el transceptor CC2500 a 2.4GHz. También tienen un sensor de temperatura de tipo NTC.
- **1 USB debugger:** para programar las tarjetas eZ430-RF2500 o comunicar por serie.

- **1 Portapilas:** Colocando dos pilas AAA se puede alimentar la tarjeta eZ430-RF2500 para probar el software con más facilidad.



El software con el que viene programado permite crear una red de sensores entre el ordenador (punto de acceso) y el nodo de *energy harvesting* solar que mide temperatura a distancia. El nodo, le enviará al punto de acceso cada cierto tiempo (configurable mediante un botón) la siguiente información:

- La temperatura actual medida en el sensor.
- La tensión de alimentación actual.
- El estado de la alimentación: si está siendo alimentado por la batería o directamente de la energía solar disponible.
- En el caso de estar siendo alimentado por la batería, enviará el número aproximado de transmisiones que puede hacer el nodo en función de la carga de la batería.

El código en C de los programas también lo proporciona el fabricante y se le ha extraído sus correspondientes diagramas de bloques que se pueden ver en el punto 1 de los anexos.

La comunicación por radiofrecuencia se realiza utilizando el protocolo *SimpliciTI* que ofrece *Texas Instruments* a los diseñadores que utilicen sus dispositivos.

La tarjeta EnerChip EH CBC5300

El módulo *EnerChip EH CBC5300* (**Fig 18**) está diseñado para recolectar energía procedente de un amplio abanico de generadores y proporcionar alimentación a un dispositivo externo (microcontrolador) en un encapsulado de 24 pines DIP. En la entrada de energía tiene un convertidor *boost* que eleva el voltaje al adecuado para cargar la batería de lámina delgada. Dos pines de entrada y salida interactúan con el microcontrolador del dispositivo:

- El pin CHARGE indica al sistema que el generador está cargando los *EnerChips*.
- El pin BATOFF es una entrada para que el microcontrolador pueda desconectar la entrada al conversor *boost*. De esta manera, en períodos largos en los que se sepa que la energía a recolectar no va a tener un voltaje suficiente no esté actuando el conversor y perdiendo energía de las baterías.

El módulo contiene dos integrados CBC050 con una batería de lámina delgada de 50 μ Ah cada uno lo que le dan una capacidad de 100 μ Ah. La salida del sistema tiene un máximo de 3.6V. La

tensión de entrada proveniente del generador deberá estar entre los 0.25 y 4V para que el conversor *boost* funcione.

Pruebas realizadas

El software pre instalado en el sensor no envía información relevante sobre el estado de la carga de la batería, ya que solo envía en número de transmisiones restantes (comienza en 400 y va descendiendo en cada transmisión) y la tensión de alimentación con poca precisión. Tampoco indica la potencia instantánea con la que está siendo cargado. Lo único que podemos saber es si en el momento del envío de la información el recolector está cargando las baterías o no, detectando también si la batería está al máximo. Esto nos complica mucho el análisis del kit por lo que nos limitaremos a hacer una sencilla prueba.

Calcularemos cual es la distancia máxima a la cual el recolector solar es capaz de recargar tanta energía como gasta en su ciclo de funcionamiento, es decir, lo cargaremos al máximo e iremos alejándolo poco a poco de la fuente de luz hasta que comience a funcionar desde las baterías únicamente. El kit de desarrollo trae la posibilidad de cambiar el tiempo entre emisiones entre: 5, 10, 20, 40, 120 y 240 segundos. Cada uno de estos ciclos consume una energía diferente (cuanto más tiempo de espera menor será la energía por hora) así que vamos a calcular la distancia máxima para cada ciclo de trabajo a la cual el recolector captura suficiente energía para tener la batería al máximo. La prueba se va a hacer con un fluorescente de 40W, en un entorno sin reflexiones. Los resultados se muestran en la **(Tabla 4)**.

Tiempo de ciclo (segundos)	Distancia al foco de luz (cm)
5	62
10	70
20	82
40	110
120	166
240	180

Tabla 4.- Resultados de la experimentación con el kit solar

Por otra parte, en un entorno de oficina (un fluorescente por cada 4 m²) comprobamos que configurando el dispositivo a un envío cada 4 minutos (240 segundos) situándolo a 3 metros del fluorescente más cercano el dispositivo es capaz de recargar toda la energía empleada en el proceso de medición de temperatura, procesamiento y envío de la información por radiofrecuencia.

Por último se ha comprobado el funcionamiento de la comunicación por radiofrecuencia y los resultados han sido muy satisfactorios. Se ha establecido comunicación sin perder paquetes a una distancia de 20 metros en línea recta, y a 12 con cierta cantidad de obstáculos. Por ello podemos decir que la comunicación es mucho más fiable que la del kit RF.

Dispositivo

1. INTRODUCCIÓN

Una vez realizado un breve estado del arte y conocidos los kit de evaluación de los que disponemos, se propone el diseño y realización de un dispositivo novedoso que aporte una funcionalidad añadida a los kits existentes.

Analizando el funcionamiento del kit de energía solar nos damos cuenta que si en algún momento el nivel de las baterías es demasiado bajo para alimentar el microcontrolador, el sistema puede volver a funcionar hasta que no es expuesto directamente a la luz solar durante unos minutos. De ahí surge la idea de evitar esta situación proporcionándole otra fuente de energía bajo demanda del propio sensor.

El producto a realizar consiste en un sensor de temperatura autónomo. El sensor se alimentará de energía fotovoltaica siempre que esté disponible. Cuando la cantidad de energía fotovoltaica recolectada no sea suficiente para cubrir la gastada por el sensor y el nivel de la batería baje de un umbral, el sensor recibirá energía en forma de radiofrecuencia, solicitándola mediante un control inteligente.

Para alcanzar este objetivo de deberá modificar tanto el *hardware* como el *software* de los kits de evaluación.

El objetivo principal es conseguir un dispositivo fiable, que envíe la información de la temperatura siguiendo estrictamente los tiempos establecidos con pocas posibilidades de fallo, sin dar tanta importancia a la eficiencia energética.

2. PUNTO DE PARTIDA

Partimos de dos kits de evaluación:

- **P2110-EVAL-01:** Kit de evaluación de *Powercast & MicroChip* para radiofrecuencia.
- **eZ430-R2500-SEH:** Herramienta de desarrollo de *energy harvesting* solar.

Estos kits han sido explicados ampliamente en el apartado anterior. Estas son las características que aprovecharemos para el diseño del dispositivo:

Kit de energía solar:

- El kit dispone de una entrada auxiliar de corriente continua a la que se le puede conectar una placa solar de apoyo, un generador termoeléctrico o cualquier otro tipo de generador.
- El sistema está siempre alimentado, de manera que el microcontrolador se encuentra la mayor parte del tiempo dormido consumiendo muy poca corriente y periódicamente se despierta para realizar las funciones de medida, procesado y envío de información por radiofrecuencia.
- El microcontrolador mide el valor de tensión de la batería además de la temperatura.

- El sensor tiene un botón que al pulsarlo se cambia de un modo de funcionamiento a otro.
- Los modos de funcionamiento del sensor son 6 y realizan las funciones de medida y envío de información cada 5, 10, 20, 40, 120 y 240 segundos.

Kit de radiofrecuencia:

- Emite una potencia constante.
- El receptor de RF tiene una salida de tensión constante regulada a 3,3 V con una corriente máxima de 100 mA.
- Cuando la salida de tensión esta activa se activa un pin que puede ser leído por un microcontrolador como interrupción.

3. IDEA INICIAL

En el esquema conceptual de la (Fig 19) se representa la idea inicial del dispositivo:

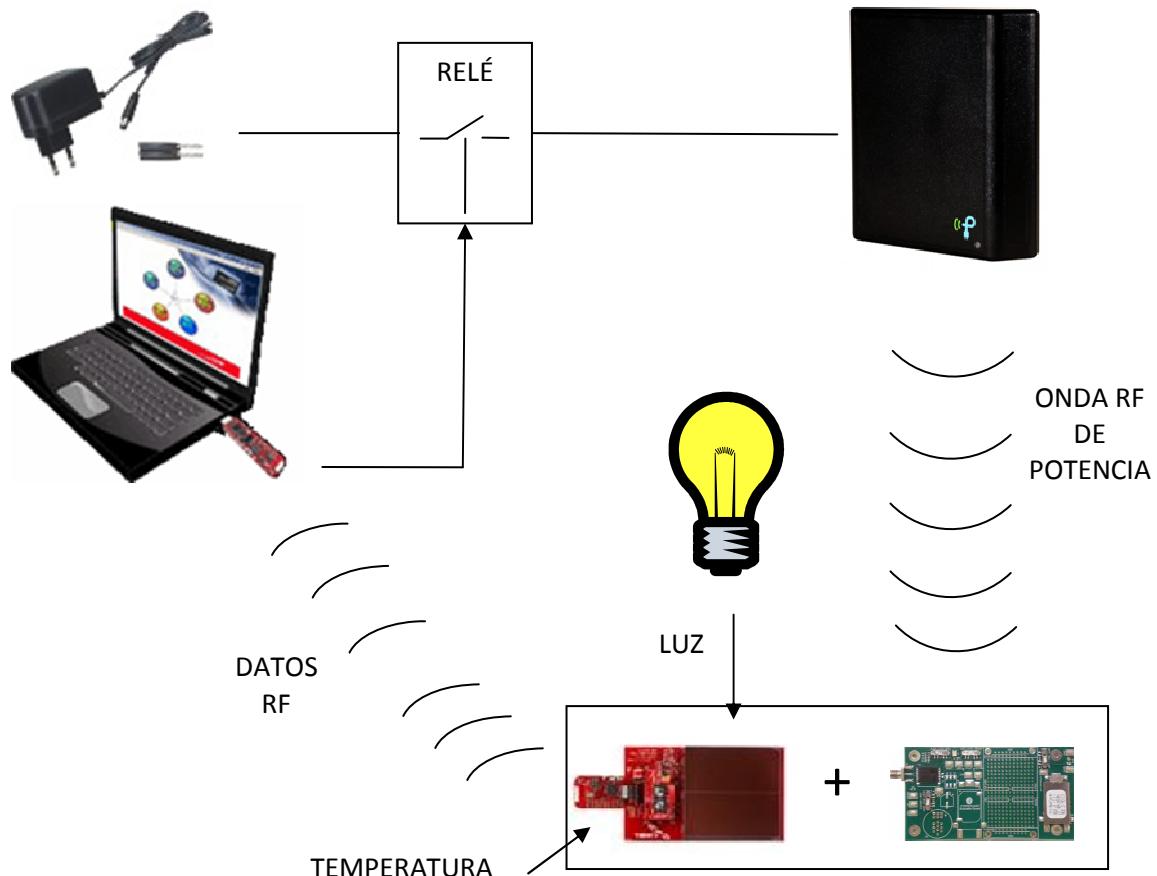


Fig 19.- Esquema conceptual del dispositivo

Del kit de energía solar aprovecharemos todos sus módulos:

- Módulo microcontrolador + transceptor rf + sensor de temperatura.
- Módulo célula fotovoltaica.
- Módulo baterías + gestión de carga de baterías + gestión de alimentación.

Del kit de radiofrecuencia utilizaremos:

- Emisor de radiofrecuencia.
- Módulo receptor de radiofrecuencia + super-condensador + regulador de tensión.
- Antena.

La idea inicial consiste en:

- Unir el receptor de radiofrecuencia en paralelo con la célula fotovoltaica para recargar las baterías mediante cualquiera de las dos fuentes de corriente.
- Controlar la emisión de radiofrecuencia mediante un relé.
- Crear un control inteligente de la alimentación controlado desde el receptor USB que estará siempre conectado a un ordenador.

La parte correspondiente al sensor de temperatura estará compuesta por los módulos de la (Fig 20).

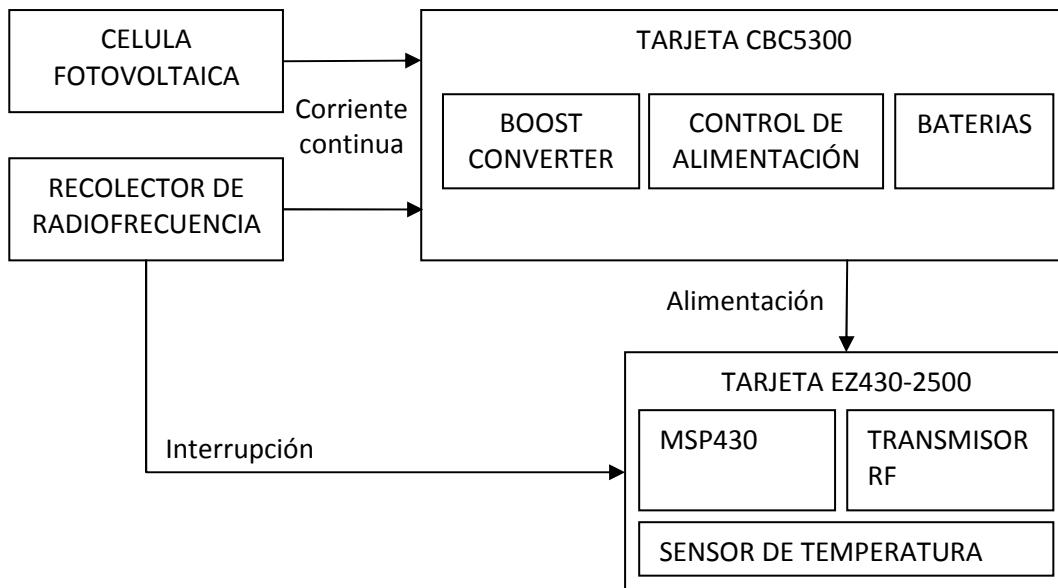


Fig 20.- Esquema modular del sensor de temperatura

4. CONTROL DE LA ALIMENTACIÓN

Debido a que la tensión medida en la batería sólo es válida cuando el dispositivo no está siendo recargado, el sistema de control tiene ciertas complicaciones. Se deberán tener en cuenta ciertas consideraciones:

- La energía enviada por radiofrecuencia no es gratuita, por lo que se deberá economizar en la medida de lo posible.
- El dispositivo de recolección de radiofrecuencia necesitará diferente cantidad de tiempo para recolectar la energía correspondiente a un paquete y suministrárselo a las baterías en función de la distancia entre emisor y receptor, pero los paquetes de energía serán iguales.

- El tiempo que se tarda recolectar la energía suficiente para enviar el primer paquete de energía es entorno a 3 veces mayor que el tiempo que se tarda en recolectar la energía para enviar el segundo.
- Dependiendo del modo de funcionamiento en el que se encuentre el sensor se necesitará más o menos paquetes de energía para mantener el dispositivo cierto tiempo fuera del umbral de batería baja. El objetivo es proporcionar la suficiente energía hasta que las condiciones de luz mejoren.

La decisión de activar el relé es sencilla: se activará cuando el receptor USB reciba dos paquetes consecutivos que indiquen que la tensión de la batería está por debajo de una tensión umbral.

Debemos desactivar el relé cuando se haya recibido la suficiente energía como para salir de la zona de baja potencia. Para ello, lo más lógico parece comprobar la tensión de la batería y cuando estemos fuera del umbral desactivarlo, pero, como hemos dicho anteriormente, la tensión de la batería no se puede medir mientras está siendo recargada debido al funcionamiento interno del gestor de baterías. La segunda opción podría ser programar un tiempo de emisión y al cabo de ciertos segundos cortarla, pero esto no proporcionaría la seguridad de que el sensor de temperatura reciba la energía. Además, el tiempo necesario de emisión depende del modo de funcionamiento y de la localización del sensor, por lo que sólo nos queda la opción de contabilizar paquetes de energía como se explica a continuación:

Cuando el receptor de radiofrecuencia le suministra un paquete de energía a las baterías, activa un pin que puede ser leído como una interrupción del microcontrolador. De esta manera contabilizaremos cada paquete de energía recibido y podremos llevar una cuenta de la energía recolectada en el propio sensor de temperatura. Será el propio sensor de temperatura el que calcule los paquetes de energía necesarios en función del modo de funcionamiento en el que se encuentre y avise al receptor USB para que corte la emisión de radiofrecuencia. El aviso consistirá en enviar un paquete de información con una temperatura clave: 9,9 V por ejemplo.

Al ser un sistema realimentado, se deberá diseñar una protección de tiempo para que, en el caso de que no llegue radiofrecuencia al sensor o el mensaje de desactivación de relé no llegue a su destino, se detecte un error y se corte el envío de radiofrecuencia.

5. PASOS REALIZADOS

A continuación se van a describir los pasos realizados en el diseño y fabricación del sensor de temperatura autónomo.

Caracterización de la batería

Empezamos por modificar el software del sensor para incluir un nuevo modo de funcionamiento de test en el que tome las medidas y las envíe cada 1 segundo para provocar su descarga rápidamente.

Tras cargar las baterías al máximo (exponiendo la célula durante más de una hora directamente a la luz del sol) anotamos los valores de tensión en la batería en cada transmisión. Tras realizar 3 veces la misma prueba podemos caracterizar la descarga de la batería en función de las transmisiones realizadas a través de la siguiente gráfica (**Fig 21**):

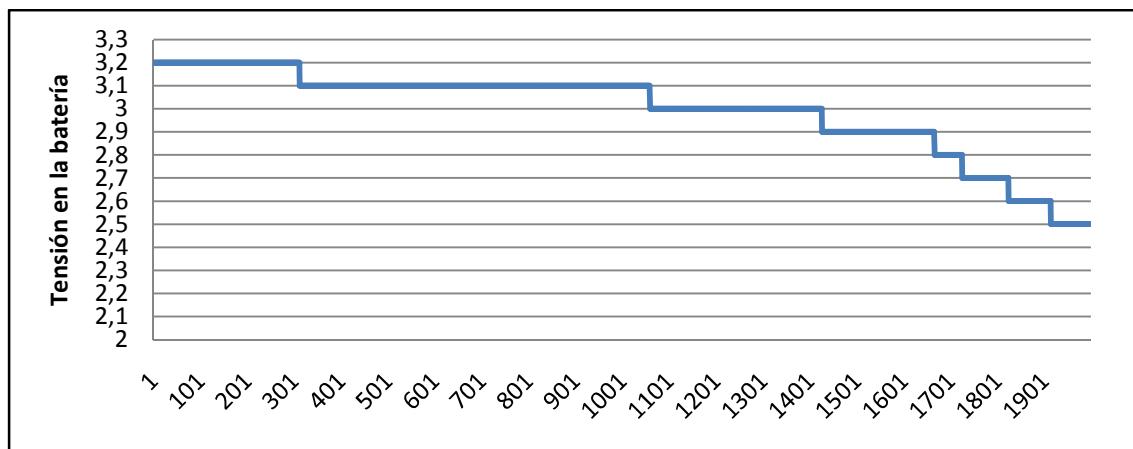


Fig 21.- Gráfica de la tensión la batería en función del número de transmisiones

De los resultados obtenidos podemos establecer en 2,8 V la tensión umbral a partir de la cual deberá activarse el sistema de alimentación de apoyo.

Software de control

Se realiza una modificación en el *software* del receptor USB para activar un pin de propósito general cuando reciba por parte del sensor que la batería está por debajo del umbral.

El pin de propósito general se utilizará para activar un relé que dará tensión al emisor de radiofrecuencia. La elección del pin se justifica en el punto 4 de los anexos.

El *software* actual recibe la tensión de la batería del sensor por radiofrecuencia y la envía por serie al ordenador. Se establecerá un paso intermedio en el que se comprobará cual es esa tensión y si se debe realizar alguna acción.

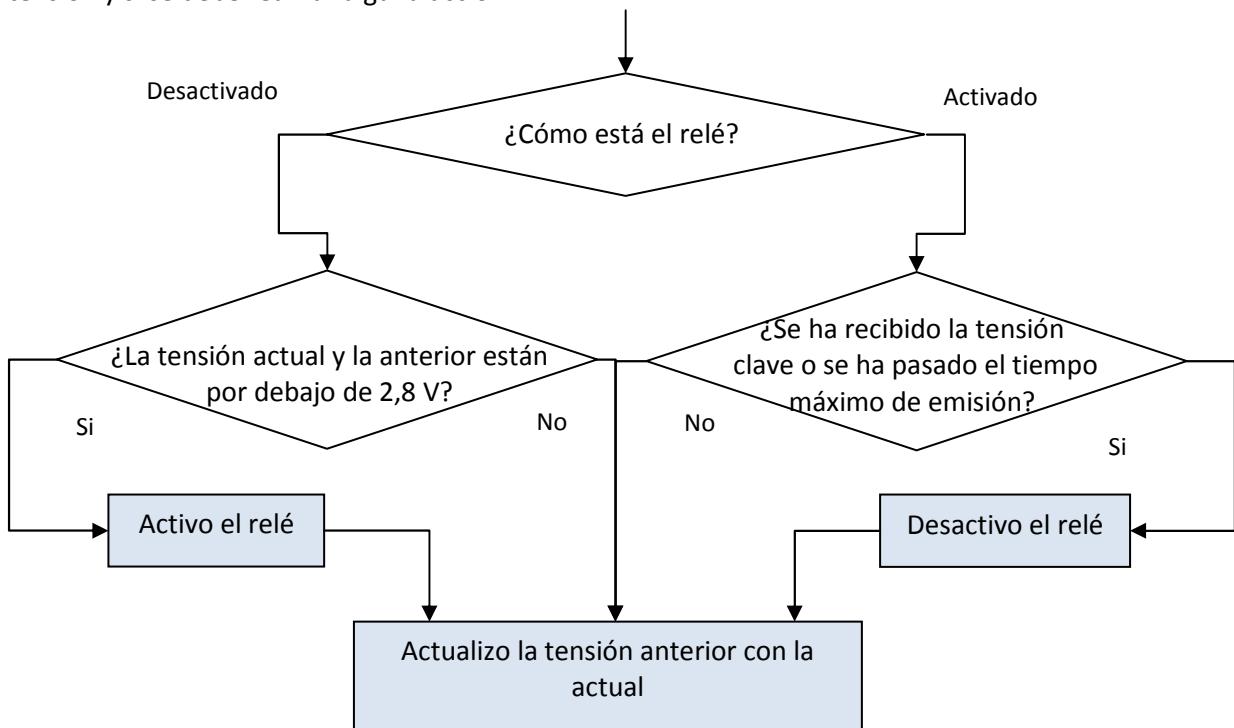


Fig 22.- Diagrama de flujo de programación

El relé se activará si se recibe dos veces una tensión menor o igual que 2,8 V (para evitar activaciones por lecturas erróneas).

El relé se desactivará cuando el sensor detecte que ya no necesite más energía y le envíe un paquete al receptor USB con una “tensión clave” que será 9,9 V. También se pondrá un contador de tiempo para que, en el caso de que el sensor reciba energía por radiofrecuencia o el paquete de información con la tensión clave no haya llegado al receptor USB, el relé se desactive por precaución.

El diagrama de flujo de la (**Fig 22**) representa el código que se deberá introducir en el programa.

Circuito de control de alimentación

Debemos controlar la alimentación del emisor de radiofrecuencia la cual es una tensión de 5 V DC. Para ello vamos a utilizar un relé tal y como se explica en el punto 4 de los anexos.

Este relé deberá ser controlado mediante un pin de propósito general del microcontrolador, cuya tensión es de 3,3 V. A partir del plano esquemático del sensor elegimos un pin para manejar el relé.

Detección de los paquetes de energía

El integrado P2110 se encarga de transformar energía de radiofrecuencia del ambiente en pulsos corriente continua regulada a 3,3 V. En cada pulso de corriente que suministra a las baterías, el integrado activa uno de sus pines a 1,2 V con una capacidad de corriente de 0,1 mA. Esta tensión no es suficiente para activar una interrupción de entrada del microcontrolador, por lo que deberemos configurar una etapa inversora. Activaremos la resistencia de pull-up interna del microcontrolador y conectaremos el colector de un transistor NPN a la entrada del microcontrolador. El emisor irá conectado a masa y la base al pin del integrado P2110 a través de una resistencia de 4k7.

Configuraremos la interrupción del microcontrolador con flanco de bajada, ya que el pin estará en estado alto por defecto.

Algoritmo de decisión de energía suficiente

A la hora de enviar energía por radiofrecuencia debemos adecuar el tiempo de emisión a las necesidades energéticas del sensor. Como el sensor lleva la cuenta de la cantidad de paquetes de energía recibidos y también es el que decide cuando se deja de enviar tendrá que ser él quien decida cuantos paquetes necesita.

Modo de funcionamiento	Número de paquetes
1 segundo	200
10 segundos	80
20 segundos	40
40 segundos	20
120 segundos	20
240 segundos	20

Tabla 5.- Número de paquetes de energía por modo

El número de paquetes dependerá únicamente del modo de operación actual del sensor. En el punto 5 del anexo se explica el procedimiento utilizado para calcular el número de paquetes correspondiente a cada modo. Los resultados obtenidos se muestran en la **(tabla 5)**.

Comprobación de distancias

Una vez establecido el número de paquetes que vamos a enviar por modo, vamos a establecer las distancias máximas para cada modo. Está claro que es necesario establecer este límite ya que la cantidad de energía por segundo que le llega al sensor depende de la distancia, y si el sensor está en un modo que gasta más energía por segundo que la energía máxima que le puede llegar puede quedarse sin baterías. Realizamos una prueba (comprobación de funcionamiento de más de 300 transmisiones seguidas) para cada modo a distintas distancias entre sensor y emisor. Si al cabo de las 300 transmisiones el sensor seguía funcionando la distancia es válida.

Modo de funcionamiento	Distancia
1 segundo	50 cm
10 segundos	3 m
20 segundos	5 m
40 segundos	7 m
120 segundos	10 m
240 segundos	15 m

Tabla 6.- Distancia máxima de funcionamiento entre emisor y receptor por modo

Estas dos últimas pruebas se han realizado en las oficinas de la empresa Pariver.

6. CONEXIÓN DE LA CÉLULA SOLAR Y EL RECEPTOR RF EN LA ENTRADAD DE CORRIENTE

A la hora de unir los dos generadores de corriente continua nos encontramos con un problema, y es que no se pueden conectar en paralelo sin ningún dispositivo adicional y que en el momento que coincidan en funcionamiento los dos generadores estaríamos creando un cortocircuito que podría dañar el dispositivo.

La solución ideal consistiría en un interruptor analógico cuya resistencia sería de 0 Ohm y que se pudiera controlar con una tensión de 1 V aprovechando el pin de interrupción del integrado P2110. Pero este dispositivo no existe, así que buscaremos un dispositivo que haga la función de interruptor que cumpla las siguientes características:

- Corriente máxima superior a 100 mA.
- Resistencia de conducción lo más baja posible.
- Consumo de corriente I_{cc} lo más baja posible.
- Tensión de alimentación 3,3 V.
- Tensiones de entrada analógicas entre 1 y 3,3 V.

Dentro del abanico de circuitos integrados comerciales existen los *analog switches*, que en principio cumplen las funciones que necesitamos pero están diseñados para multiplexar señales, no tensiones de alimentación. Es por esto que no cumplen con las características técnicas que necesitamos para nuestra aplicación: la corriente consumida en reposo es muy

elevada (mayor de $10 \mu\text{A}$) y los dispositivos que permiten el paso de una corriente de 100 mA tienen una resistencia de conducción demasiado elevada (mayor de 10Ω).

Otra opción sería utilizar una etapa con transistores JFET para realizar dos interruptor controlados alternativamente, pero para alcanzar la tensión de *pinch-off* necesitaríamos una tensión de control negativa. Para obtenerla necesitaríamos un circuito de bomba de carga lo que añadiría un consumo considerable al dispositivo.

Por último, planteamos la solución más sencilla que será la que se lleve a cabo, aunque no sea la más eficiente energéticamente hablando. Se utilizará una configuración de detector de máximos colocando un diodo en serie con cada generador de corriente de manera que los cátodos de los diodos estén unidos con la entrada del recolector. Para ello se utilizarán diodos Schottky de muy baja caída de tensión en directa para evitar pérdidas de potencia.

7. PUREBA DE CAMPO

Para la comprobación del funcionamiento del dispositivo se han realizado dos pruebas de campo que han consistido en lo siguiente:

- Funcionamiento del sensor sin ningún tipo de energía fotovoltaica (célula solar tapada) con el modo de funcionamiento de 240 segundos por transmisión a una distancia de 7 metros del emisor. Se dejó funcionando durante un fin de semana (56 horas).
- Funcionamiento del sensor en un ambiente de oficina (a 2,5 metros del fluorescente más cercano) con el modo de funcionamiento de 120 segundos por transmisión a una distancia de 5 metros del emisor. Se dejó funcionando durante una semana completa (168 horas).

Ambas pruebas resultaron satisfactorias ya que el sensor no falló al envío de la temperatura en ningún momento.



CONCLUSIÓN

Tras la realización de este trabajo de fin de máster podemos concluir que el concepto de *energy harvesting* está en la vanguardia de la innovación en cuanto a electrónica se refiere. Todas las universidades, centros de investigación y empresas del sector están mostrando su interés y exhibiendo sus avances en todos los campos: generadores piezoelectricos, termoeléctricos, células fotovoltaicas, antenas y recolectores de radiofrecuencia, microcontroladores de bajo consumo y sistemas de almacenamiento de energía. Esto se está viendo reflejado en la creciente oferta de kits de evaluación que ha surgido en el último año en respuesta a la demanda de los fabricantes de dispositivos electrónicos que buscan una alternativa a las baterías para alimentar sus dispositivos.

Con la experimentación realizada sobre dos de estos kits de evaluación (solar y de radiofrecuencia) hemos podido acercarnos a la aplicación más común de la recolección de energía del medio: los sensores inalámbricos. Ha resultado muy interesante trabajar con dispositivos en los que se debe tener en cuenta cada milíwatio de potencia, maximizando la eficiencia tanto en el *hardware* como en el *software*. Cabe destacar el kit de transmisión de energía por radiofrecuencia, por su novedad y por las nuevas posibilidades que ofrece respecto a las formas de recolectar energía y conocidas.

Por último, la fabricación de un dispositivo novedoso, como es el sensor de temperatura solar con alimentación de apoyo por radiofrecuencia ha sido un objetivo difícil de cumplir, pero se ha logrado. Aunque la transferencia de potencia entre el recolector de radiofrecuencia y las baterías no es todo lo eficiente que se podría desear, la fiabilidad del dispositivo es muy alta. Con la fabricación de este dispositivo se demuestra la viabilidad del concepto de usar la energía de radiofrecuencia como apoyo a dispositivos que se alimentan de energía del ambiente para evitar que dejen de funcionar en períodos en los que la energía principal no es suficiente.

GLOSARIO

AC: *Alternating Current* (corriente alterna).

ADC: *Analog to Digital Converter* (conversor analógico digital).

ANT: Protocolo propietario de *Dynastream Innovations Inc.* para redes de sensores inalámbricos de baja potencia que opera en la franja de 2.4GHz.

ATEG: *Automobile Thermo-Electric Generator* (generador termoeléctrico para automóviles).

CES: *Consumer Electronics Show*. Feria de la electrónica de consumo que tiene lugar cada año en Las Vegas.

DIP: *Dual In-line Package*. Empaquetado para dispositivos electrónicos que ordena sus pines en dos líneas paralelas.

GPIO: *General Pin Input Output* (Pines de propósito general).

GSM: *Global System for Mobil communications*. Estándar de telecomunicaciones para telefonía móvil que opera en las banda de 900MHZ y 1800 MHZ. Se le conoce como 2G.

GTE: Generador Termo-Eléctrico.

HVAC: *Heating Ventilation and Air Conditioning*. Sistemas de control de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

I2C: *Inter-Integrated Circuit*. Bus de comunicaciones serie inventado por Philips muy extendido en la electrónica como protocolo de comunicación entre microcontroladores y otros dispositivos.

ID: Identificación.

IDE: *Integrated Development Tool*: Herramienta de desarrollo integrada. Se denomina así al conjunto de programas y librerías que se necesitan para crear y hacer funcionar un *software*.

IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. Asociación profesional no lucrativa dedicada a la innovación tecnológica en los campos de la electricidad y la electrónica.

ISE: *Institute for Solar Energy Systems*(Instituto de sistemas de energía solar).

LE: *Low Energy* (Baja potencia).

LED: *Light Emmiting Diode*. Diodo que luce cuando por su unión P-N circula corriente.

MFC: *Macro Fibre Compose*. Compuesto de macro fibras de material piezoeléctrico.

MIPs: *Million Instructions per Second*. Millones de instrucciones por Segundo, es la manera de medir la velocidad de ejecución de código de un microcontrolador.

MIT: *Massachusetts Institute of Technology* (Instituto Tecnológico de Massachusetts).

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*. Agencia espacial de los estados unidos.

NTC: *Negative Temperature Coerfficient resistor*. Resistencia de coeficiente de temperatura negativo. Su Resistencia varía con la temperatura.

ORNL: *Oak Ridge National Laboratoy*. Laboratorio sobre ciencia y energía situado en *Oak Ridge (Tennessee)*.

PZT: Abreviatura para el material piezoeléctrico conocido como circonato-titanato de plomo.

QP: *Quick Pack*. Dispositivo piezoeléctrico flexible.

RAM: *Ramdom Access Memory*. Memoria de acceso aleatorio.

RF: *Radiofrequency*. Radiofrecuencia.

SIG: *Special Interest Group*. Grupo de interés especial.

SPI: *Serial Peripheral Interface Bus*. Bus serie para la comunicación entre dispositivos de topología Master-Eslavos.

UART: *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*. Comunicación serie bilateral entre dispositivos electrónicos.

USB: *Universal Serial Bus*. Estándar industrial para conectar dispositivos a un ordenador.

WI-FI: Mecanismo de conexión inalámbrica para dispositivos electrónicos (generalmente

BIBLIOGRAFIA

[1] Energy harvesting markets analyzed: a \$4.4 Billion Market in 2021.

Press release.

<http://www.energyharvestingjournal.com/articles/energy-harvesting-markets-analysed-a-4-4-billion-market-in-2021-00003643.asp>

(07/11/2011)

[2] Energy Harvesting: ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers.

White paper.

Murugavel Raju, MCU Strategic Marketing Texas Instruments.

[3] Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries.

Henry A. Sodano and Daniel J. Inman *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10), 799-807, 2005

[4] Energy harvesting systems using piezo-electric macro fiber composites.

Thomas P. Daue, Jan Kunzmann, Andreas Schönecker

[5] An overview of composite actuators with piezoceramic fibers.

R. Brett Williams, Gyuhae Park, Daniel J. Inman and W. Keats Wilkie

[6] Pagina web del fabricante MIDE

<http://www.mide.com>

(07/11/2011)

[7] Página web del fabricante Advanced Cerametrics

<http://www.advancedcerametrics.com>

(07/11/2011)

[11] Photovoltaic energy-conversion system powered by heat alone.

MIT researchers

<http://www.physorg.com/pdf231131817.pdf>

(07/11/2011)

[12] World Record: 41.1% efficiency reached for multi-junction solar cells at Fraunhofer ISE.

Press release

<http://www.ise.fraunhofer.de/press-and-media/press-releases/press-releases-2009/world-record-41-1-efficiency-reached-for-multi-junction-solar-cells-at-fraunhofer-ise>

(07/11/2011)

[13] Página web del kit de desarrollo de energía solar de Texas Instruments: MSP430 Solar Energy Harvesting

<http://www.ti.com/tool/ez430-rf2500-seh>

(07/11/2011)

[14] Página web del kit de desarrollo de energía solar de Silabs: Energy Harvesting with Wireless Sensor Node

<http://www.silabs.com/products/mcu/Pages/ENERGY-HARVEST-RD.aspx>

(07/11/2011)

[17] Página web del fabricante Nextreme Thermal Solutions<http://www.nextreme.com/>

(07/11/2011)

[19] Vehicle Fuel Economy Improvement through Thermoelectric Waste Heat Recovery

DEER Conference, 2005, Chicago, IL, USA

LaGrandeur J., Crane D., Eder A.

[20] Fujitsu Develops Hybrid Energy Harvesting Device for Generating Electricity from Heat and Light<http://www.fujitsu.com/global/news/pr/archives/month/2010/20101209-01.html>

(01/11/2011)

[23] Harvesting Energy out of Thin Air. Researchers capture electromagnetic signals to power small electronics<http://theinstitute.ieee.org/technology-focus/technology-topic/harvesting-energy-out-of-thin-air>

(01/11/2011)

[24] RCA creating Wi-Fi-powered gadget chargerhttp://ces.cnet.com/8301-31045_1-10433178-269.html

(01/11/2011)

[25] Goodbye wires! MIT team experimentally demonstrates wireless power transfer, potentially useful for powering laptops, cell phones without cords

Franklin Hadley, Institute for Soldier Nanotechnologies

<http://web.mit.edu/newsoffice/2007/wireless-0607.html>

(07/11/2011)

[26] Sony develops highly efficient wireless power transfer system based on magnetic resonance. Transfers 60 Watts of electrical power over a distance of 50cm

Press release

<http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/200910/09-119E/index.html>

(07/11/2011)

[27] Página web del kit de desarrollo de energy harvesting de radiofrecuencia<http://www.powercastco.com/products/development-kits/>

(07/11/2011)

[28] MSP430x2xx Family User's Guide

Texas Instruments Technical Documentation

[29] Thin-Film Batteries: Current and Future Markets 2009-2006

NanoMarkets LC

[30] JEOL Ltd. (JEOL; Yoshiyasu Harada, President) and Advanced Capacitor Technologies Inc. (ACT; Toru Usami, President) have developed a new model of high energy double layer supercapacitor, Premlis®, featuring an enhanced energy density of 30 Wh/kg<http://www.jeol.com/NEWSEVENTS/PressReleases/tabid/521/articleType/ArticleView/articleId/112/A-30-Whkg-Supercapacitor-for-Solar-Energy-and-a-New-Battery.aspx>

(07/11/2011)

[31] COMPARISON BETWEEN LO POWER WIRELESS TECHNOLOGIES
Phil Smith, *Marketing Manager HBU, CSR plc.*

[35] P2110 – 915 MHz RF Powerharvester Receiver
Product Datasheet

[8] Página web del integrado LTC3588 de Linear Technologies
<http://www.linear.com/product/LTC3588-1>
(15/11/2011)

[9] Solar Cell Breaks Efficiency Record. Recycling photons raises the energy output
Neil Savage. August 2011
<http://spectrum.ieee.org/green-tech/solar/solar-cell-breaks-efficiency-record>
(15/11/2011)

[10] Turning windows into powerplants. New technology from MIT could enable a building's windows to generate power, without blocking the view.
David L. Chandler, MIT News Office
<http://web.mit.edu/newsoffice/2011/transparent-solar-windows-0415.html>
(15/11/2011)

[18] Advanced thermoelectric materials and generator technology for Automotive Waste Heat at GM
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww1.eere.energy.gov%2Fvehiclesandfuels%2Fpdfs%2Fthermoelectrics_ap_p_2011%2Fmonday%2Fmeisner.pdf&ei=nSi8TsHtCIPLtAafraE2&usg=AFQjCNHFKWkdodqit7BsSd4Q3v6nmqDyw
(15/11/2011)

[15] Página explicativa sobre generadores termoeléctricos de la empresa Ferrotec.
<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef01/>
(15/11/2011)

[16] Informe científico sobre energy harvesting del IMEC.
<http://www.imec.be/ScientificReport/SR2009/HTML/1213371.html>
(15/11/2011)

[21] Página web del kit de desarrollo WPG-1 de Nextreme Thermal Solutions.
http://www.nextreme.com/pages/power_gen/wpg-1.shtml
(15/11/2011)

[22] Página web del kit de desarrollo Power Node de Micropelt
http://www.micropelt.com/applications/te_power_node.php

[32] Página web del dispositivo Nike+
<http://en.wikipedia.org/wiki/Nike%2BiPod>
(15/11/2011)

[33] Página web del protocolo de comunicación MiWi
<http://en.wikipedia.org/wiki/MiWi>
(15/11/2011)

[34] Página web del protocolo de comunicación SimpliciTI

<http://www.ti.com/tool/simpliciti>

(15/11/2011)

Anexos

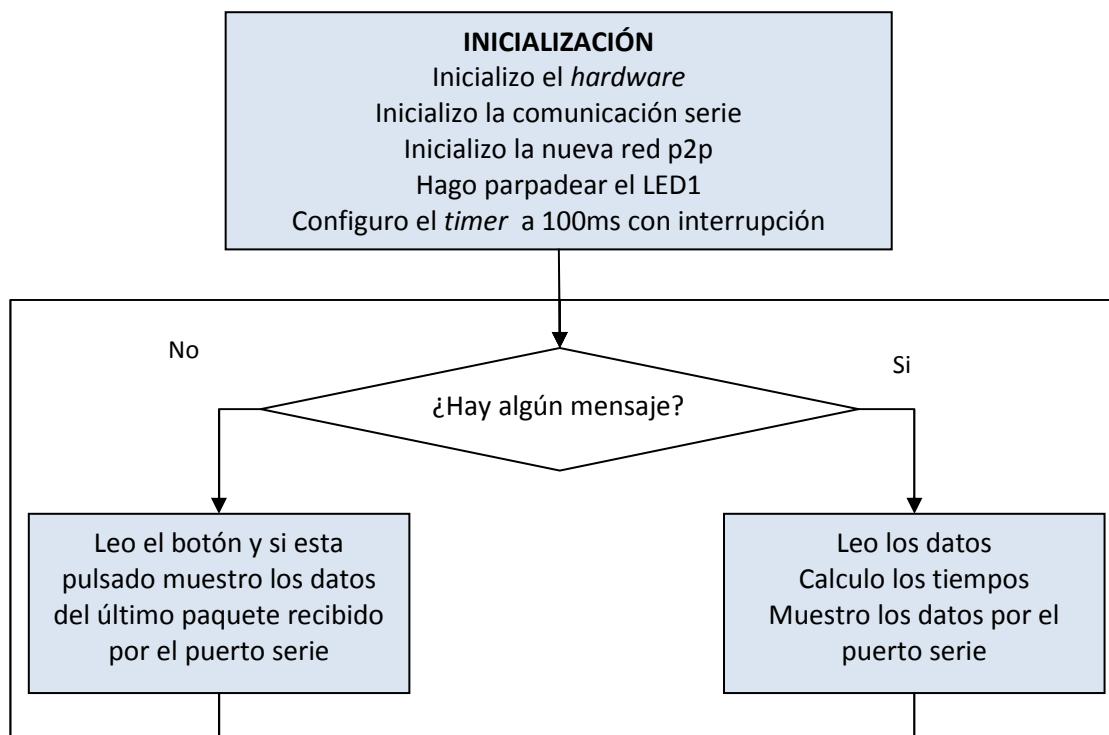
1. DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN

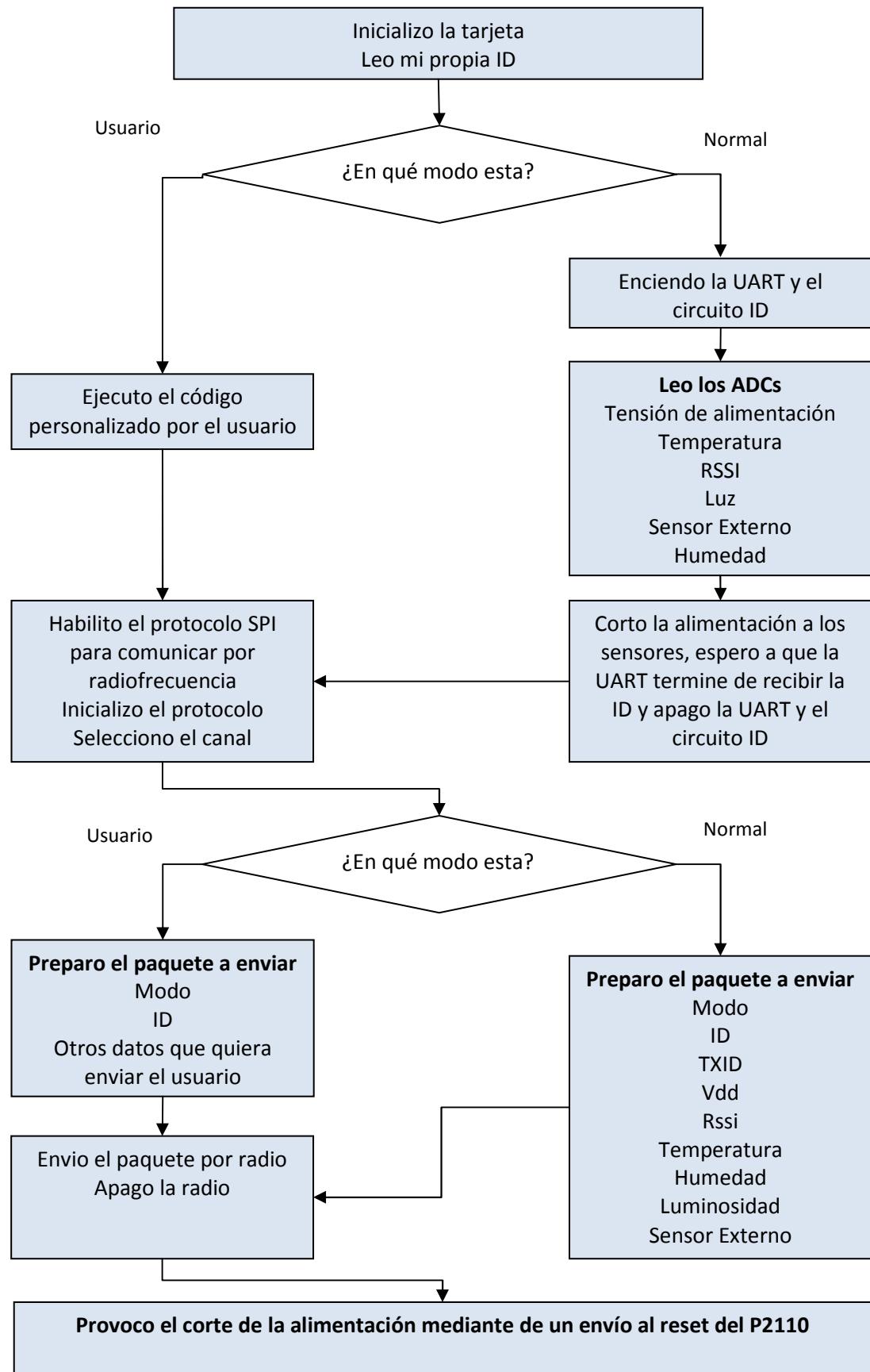
Todos los programas se encuentran escritos en lenguaje C. El kit de evaluación de RF proporciona el IDE MPLAB. El kit solar proporciona el IDE *Code Composer*.

El kit de energía solar utiliza una comunicación a 2.4 GHz sobre un protocolo propietario de *Texas Instruments* llamado “SimpliciTI”.

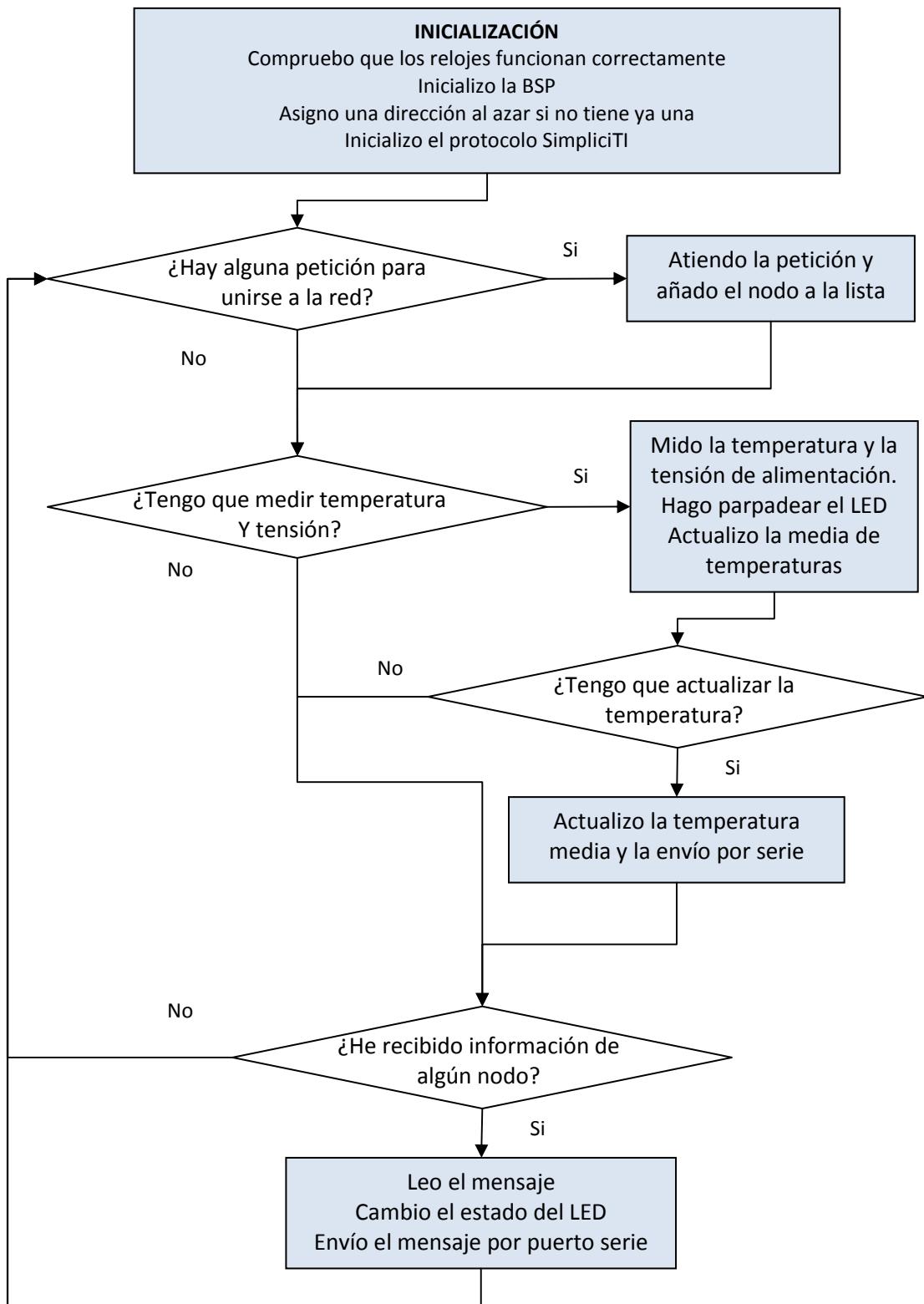
El kit de radiofrecuencia utiliza una comunicación a 2.4 GHz sobre un protocolo propietario de *Microchip*.

Tarjeta XLP16: Punto de acceso en el kit RF



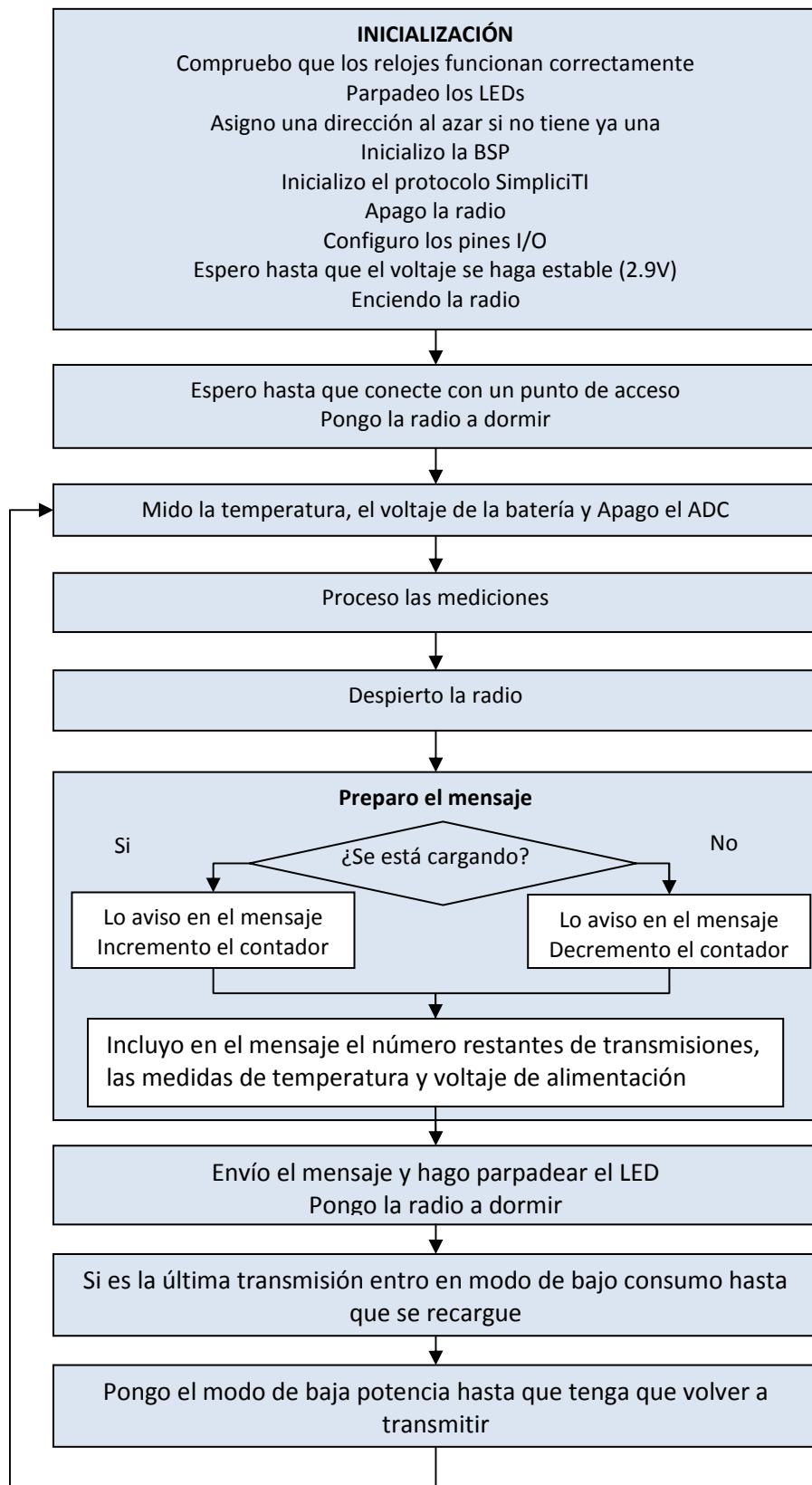
Tarjeta de sensores: Nodo en el kit RF

Tarjeta eZ430-2500: Punto de acceso en el kit Solar



El *timer B0* se utiliza para activar el semáforo que indica que hay que medir la temperatura propia.

Tarjeta eZ430-2500: Nodo en el kit Solar

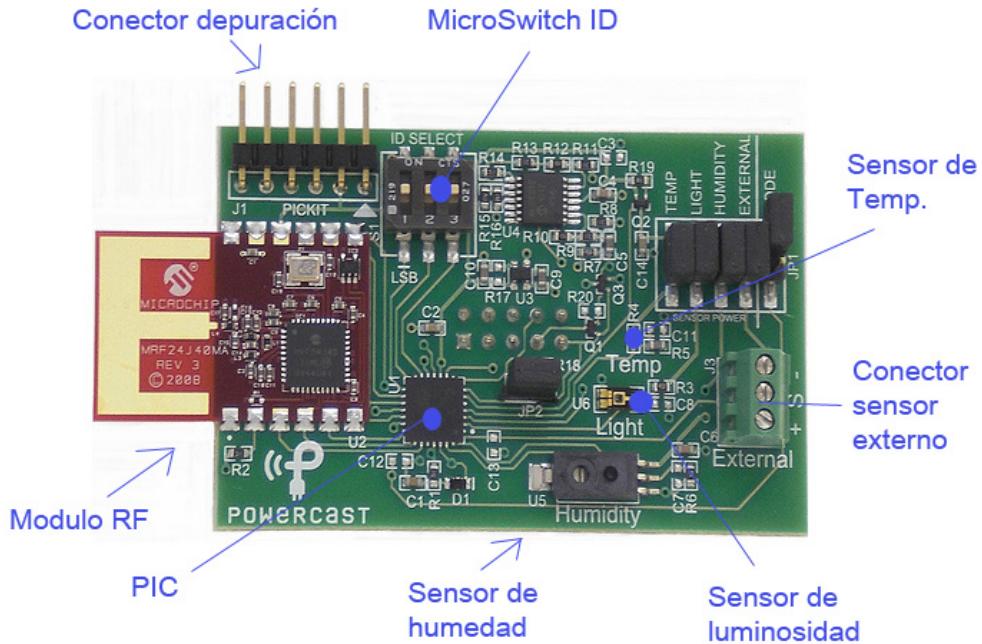


El *timer B0* se utiliza para salir del modo de baja potencia cada 3 segundos.

El botón hace saltar una interrupción que hace parpadear el LED y cambiar al estado siguiente.

2. IMÁGENES DESCRIPTIVAS

Tarjeta de sensores: Nodo en el kit RF



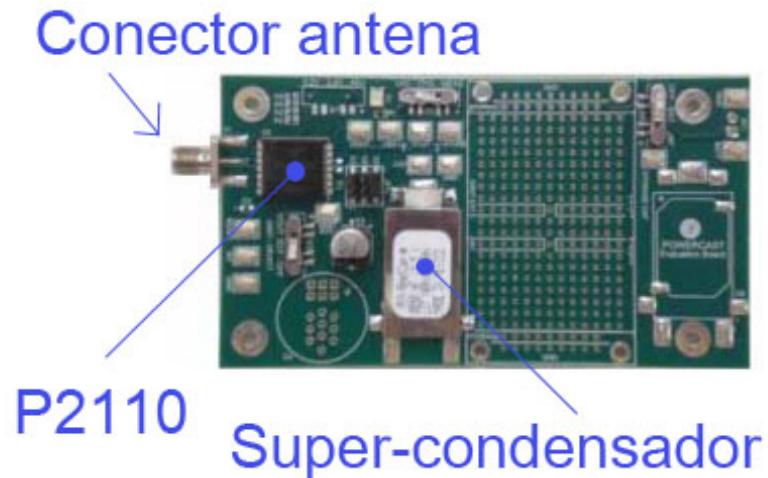
La tarjeta tiene:

- Un DIP switch de 3 Switches ON/OFF para configurar una ID de la tarjeta.
- Un Jumper (J2) para en caso de querer medir la corriente que consume la tarjeta solo hay que quitar el Jumper y colocar dos sondas de osciloscopio en modo diferencial (ya que la tarjeta tiene una resistencia de 10 Ohm según el esquemático (10.6 según el polímetro))
- Un conector de 3 pines para un sensor externo (VCC=3V, GND y Sense). Se puede colocar un condensador para filtrar la medida (C13).
- 5 jumpers que dan alimentación a los sensores y al GPIO de modo.
- Hay un transistor que es activado por el micro para dar alimentación a los sensores cuando se va a realizar la medida (para que solo se alimenten el tiempo necesario).
- Sensor de Humedad HIH 5030
- Sensor de temperatura: resistencia NTC
- Sensor de luminosidad: TEMT6000X01

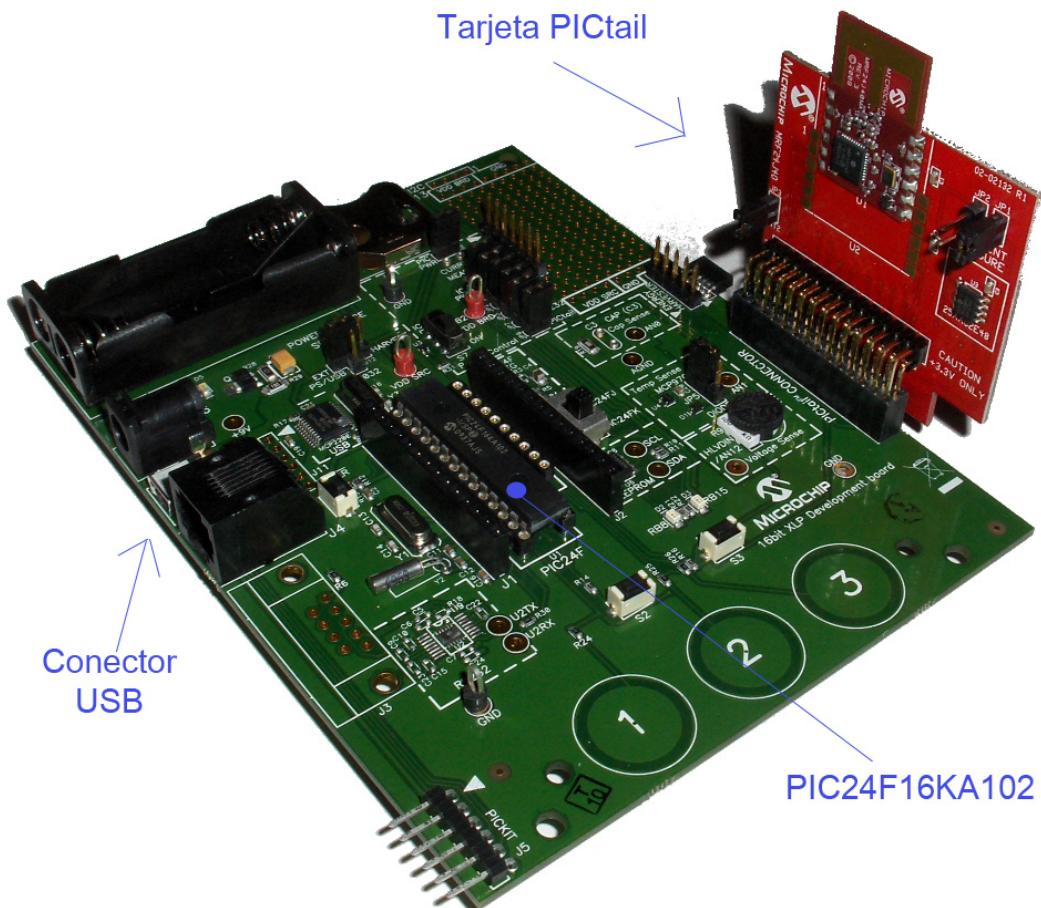
Antenas

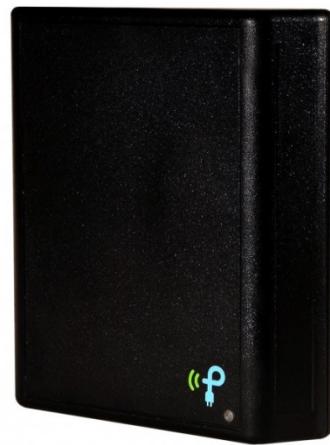


Tarjeta de recolección RF: P2110-EVAL

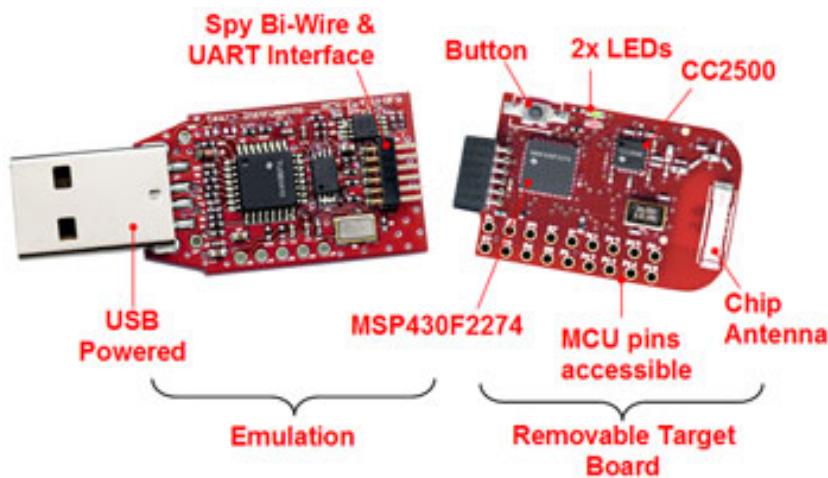


Tarjeta XLP16 development board + tarjeta PICtail: Punto de acceso en el kit RF

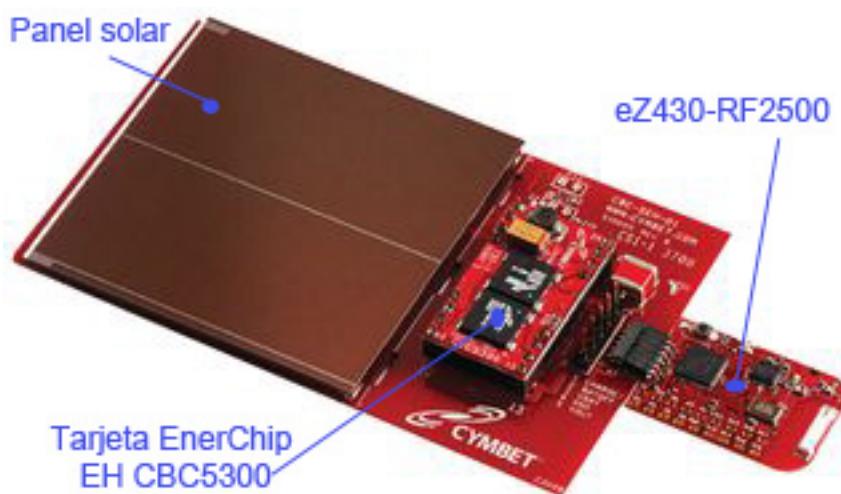


Emisor de Potencia de RF

Tarjeta eZ430-2500 + USB debugger: Punto de acceso en el kit Solar



Tarjeta recolector solar + Tarjeta eZ430+2500: Nodo en el kit Solar



3. DATOS DE LA EXPERIMENTACIÓN CON EL KIT RF

Para calcular la energía que suministra el integrado P2110 en cada ciclo utilizando el condensador de 1000 μF realizaremos 3 estimaciones diferentes.

Cálculo mediante la ecuación del datasheet (ecu 1):

$$C = 15V_{OUT}I_{OUT}t_{ON}$$

$$1000 \mu F = 15 \cdot 3,3 V \cdot I_{OUT} A \cdot t_{ON} s$$

$$Energía = \frac{1000 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 3,3 \cdot 3600} 5,5 nAh$$

Observación en el osciloscopio del consumo del LED:

El tiempo durante el cual pasa corriente por el LED es de 2750 μs y la caída de tensión en él es de 2 V. Sabiendo que la resistencia en serie con el LED es de 100 Ω y que la tensión de salida es de 3,3V calculamos la corriente consumida por el LED mediante la ley de Ohm:

$$\frac{3,3 - 2}{100} = 13 mA$$

$$Energía = \frac{13 \cdot 10^{-3} \cdot 2750 \cdot 10^{-6}}{3600} = 9,9 nAh$$

Observación en el osciloscopio del consumo de una resistencia de 100 Ω :

El tiempo durante el cual pasa corriente por la resistencia es de 1 ms y la caída de tensión en ella es de 3,3 V. Mediante la ley de Ohm calculamos la corriente consumida:

$$\frac{3,3}{100} = 33 mA$$

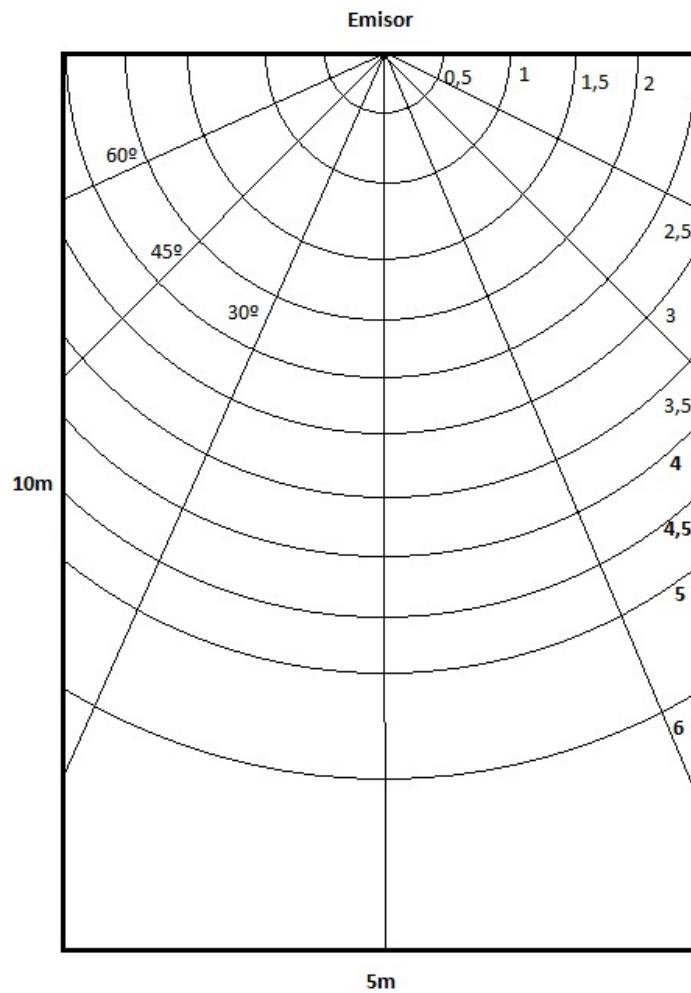
$$Energía = \frac{33 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{3600} = 9,16 nAh$$

Teniendo en cuenta que la fórmula extraída del datasheet es una referencia para el diseño, tomaremos la cantidad de 9 nAh como la energía suministrada en cada ciclo. Expresada en forma de potencia serán unos 30 nW.

A la hora de medir la potencia instantánea en función de la distancia y ángulo entre emisor y recolector, se van tomando los tiempos (en segundos) que le cuesta al dispositivo recolectar la energía suficiente para hacer parpadear el LED una vez.

Zona de ensayos:

Esta es la disposición de la zona de pruebas:



Las medidas obtenidas de tiempo en segundos son:

Antena dipolo					
Distancia (metros)	Grados				
	0	15	30	45	60
2	1	1	1	1,1	1,6
2,5	1,1	1,1	1,2	1,5	4
3	2	2	2,1	2,5	6
3,5	2,6	1,6	2	2,2	no
4	4,1	3,5	2,3	no	no
4,5	4,5	3,4	2,9	no	no
5	7	5	no	no	no
5,5	9	7	no	no	no
6	10	12,6	no	no	no
6,5	8	10	no	no	no
7	9	10,6	no	no	no
7,5	8,2	13	no	no	no
8	20	24	no	no	no
10	43	no	no	no	no

Antena parche					
Distancia (metros)	Grados				
	0	15	30	45	60
2	0,3	0,3	0,3	0,4	1
2,5	0,4	0,4	0,5	1	2
3	0,7	0,7	0,7	0,9	1,7
3,5	1	1,1	1,1	1,2	no
4	0,7	0,8	1,3	no	no
4,5	1,7	1,1	1	no	no
5	2,4	1,8	no	no	no
5,5	1,3	1,9	no	no	no
6	3,1	3,2	no	no	no
6,5	2,1	1	no	no	no
7	1,9	1,6	no	no	no
7,5	1,6	2	no	no	no
8	2,4	2,7	no	no	no
10	3,8	no	no	no	no

La etiqueta "no" significa que no se puede realizar la medición por falta de espacio.

4. ELECCIÓN DEL PIN DE PROPOSITO GENERAL PARA EL CONTROL DEL RELÉ

El pin de propósito general a utilizar lo seleccionaremos en función de los pines que no estén siendo utilizados y de los pines que tengamos fácil acceso.

Puerto	Función	Pines disponibles en el conector Extraído del datasheet																	
P1.0	LED Rojo	P10	GND	P20	P2.0	P21	VCC_EXT	P40	P2.2	P23	P60	P2.4	P4.3	P80	P4.4	P4.5	P100	GND	
P1.1	LED Verde	P70	P2.1	P71	P2.3	P120	P4.6	P110	P4.6	P121	P4.5	P101	P4.4	P122	P4.3	P140	GND	P123	GD02
P1.2	Botón	P90	P4.4	P91	P4.6	P111	P4.6	P130	GD00	P141	P3.3_UCB050MI	P160	P3.3_UCB0CLK	P142	P3.2_UCB050MI	P161	P3.1_UCB050MI	P180	P3.0_UCB0STE
P3.4	TX	P150	P3.2_UCB050MI	P151	P3.0_UCB0STE	P170	P3.0_UCB0STE	P171	P3.0_UCB0STE	P181	P3.1_UCB050MI	P182	P3.0_UCB0STE	P183	P3.0_UCB0STE	P184	P3.0_UCB0STE	P185	P3.0_UCB0STE
P3.5	RX	Pines utilizados																	

Elegimos el Puerto 4.5 para tener un acceso fácil a través del contacto P10 que está situado al lado de la masa (P12). El relé se conectará al P10 (+) y al P12 (GND).

5. DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DE LA ALIMENTACIÓN DEL EMISOR DE RADIOFRECUENCIA

Para el control de la alimentación del emisor RF vamos a utilizar un relé. Sus características deben ser:

- Tensión de alimentación: 5 V.
- Corriente máxima permitida por encima de 1 A.

El relé elegido tiene una bobina de 270 Ohm de resistencia, lo cual demanda una corriente de 18,5 mA para comutar. El transistor deberá ser un NPN de señal. El transistor elegido (BC547) tiene una ganancia mínima de 100, por lo que una corriente de 0,2 mA sería suficiente para saturar el transistor. Al ser el receptor USB y no el sensor no tenemos problemas de consumo.

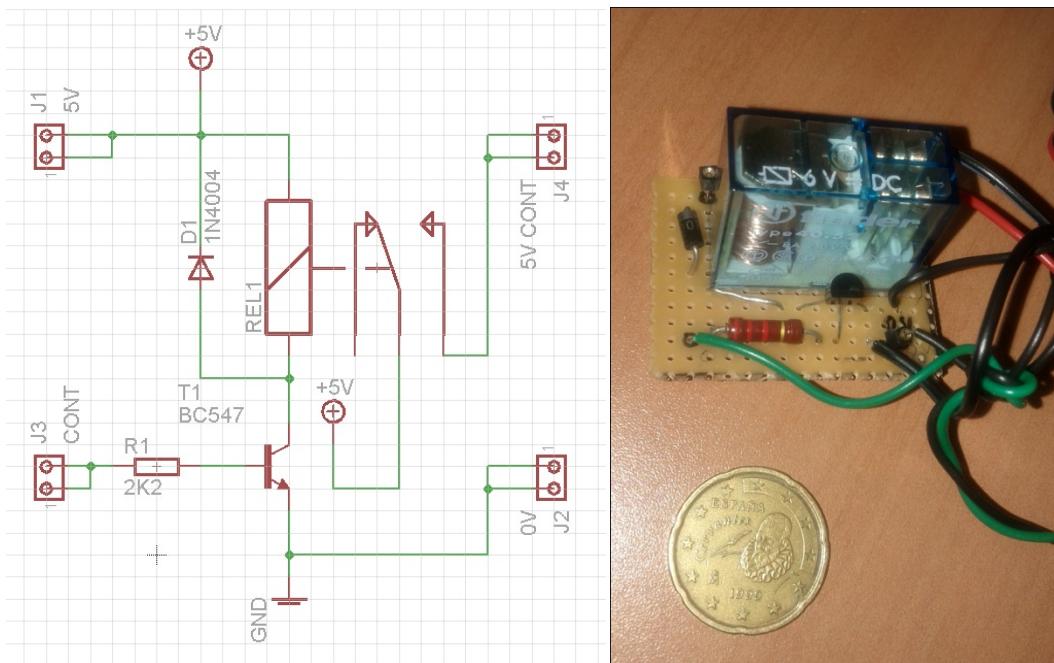
La tensión de salida del pin de propósito general del micro es de 3,3 V. La caída de tensión en entre la base y el emisor del transistor es de 0,7 V. Por lo tanto la resistencia de base deberá cumplir:

$$R_b \leq \frac{3,3 - 0,7}{2 \cdot 10^{-4}} = 13K\Omega$$

Elegimos una resistencia de 2K2Ω.

Necesitamos un diodo para facilitar el retorno de la corriente de la bobina después de la desconexión. Para ello utilizaremos un diodo convencional (1N4004).

El circuito realizado es el siguiente:



- J1: Tensión 5 V. Conexión del cable rojo proveniente del transformador.
- J2: Masa 0 V. Unión del cable negro del transformador y del cable negro del receptor USB. También sale de este punto el cable negro que le proporciona masa al transmisor.
- J3: control. Conexión directa al pin de propósito general del microcontrolador que controla la alimentación (cable verde).
- J4: Tensión controlada de 5 V. Conexión del cable rojo que lleva la tensión de 5 V al transmisor de radiofrecuencia.

6. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE ENERGÍA POR MODO DE FUNCIONAMIENTO

El método de estimación del número de paquetes necesario en cada modo fue el de ensayo y error. Se asignó un número de paquetes (10) al modo 1 (1 segundo). Colocando el dispositivo cerca del emisor de radiofrecuencia (para que se transfieran los paquetes en menos de un ciclo) se dejó funcionando el sistema durante unos minutos. El resultado fue que la energía transmitida por radiofrecuencia no era suficiente para compensar la pérdida ni si quiera en 2 paquetes. Se fue subiendo el número de paquetes hasta que con 200 paquetes la energía transferida era suficiente para compensar 6 paquetes.

Una vez establecido el número de paquetes para el primer modo pasamos al segundo (10 segundos) mediante el mismo método comprobamos que con 80 paquetes compensamos aproximadamente 6 transmisiones lo que equivale a 1 minuto de funcionamiento.

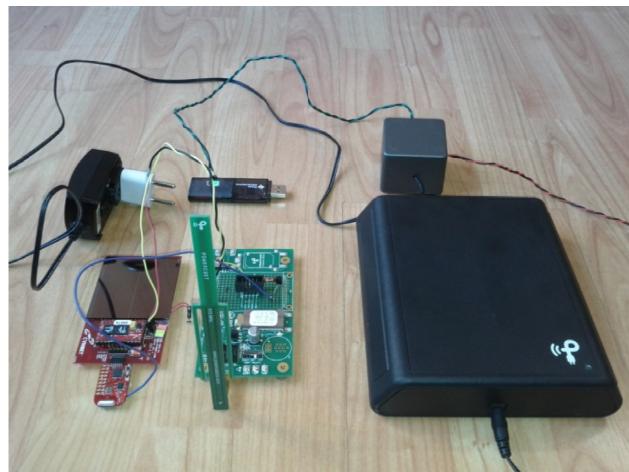
El resto de modos se calculan mediante estimación una vez conocidos los resultados de los modos que más consumen.

7. MANUAL DE INSTALACIÓN Y USO

La siguiente documentación se ha realizado para quede en la empresa Pariver y que cualquier trabajador pueda conocer el funcionamiento del dispositivo



Sensor de temperatura inalámbrico alimentado por energía fotoeléctrica con sistema de alimentación de apoyo por radiofrecuencia



Instalación y manual de uso

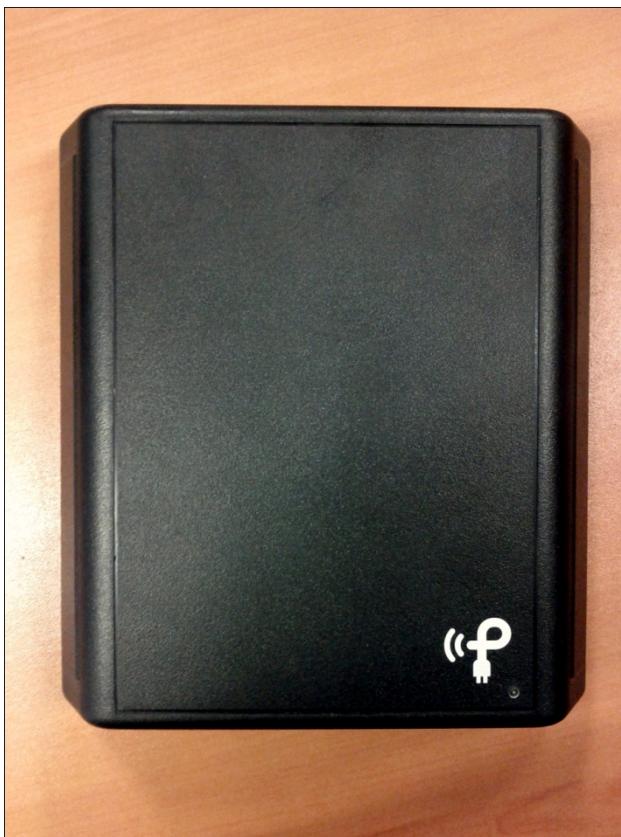
Noviembre de 2011
Rev. A

Índice

LISTA DE DISPOSITIVOS	5
1. EMISOR DE POTENCIA RF	5
2. ALIMENTADOR DE TRANSMISOR.....	5
3. RECEPTOR USB.....	6
4. TARJETA SENSOR.....	6
5. TARJETA CÉLULA FOTOVOLTAICA	6
6. TARIETA RECEPCIÓN DE RADIOFRECUENCIA	7
7. ANTENA DE RADIOFRECUENCIA.....	7
8. CD SOFTWARE	7
INSTALACIÓN	8
1. INSTALACIÓN DEL SOFTWARE	8
Instalación del software de interfaz gráfica.....	8
Configuración del hyperterminal.....	8
2. CONEXIÓN DEL RECEPTOR USB Y EL ALIMENTADOR DEL TRANSMISOR	9
3. CONEXIÓN DEL CIRCUITO DE CONTROL AL EMISOR DE RADIOFRECUENCIA.....	9
4. CONEXIÓN DE LA ANTENA A LA TARJETA DE RECEPCIÓN DE RADIOFRECUENCIA.....	9
5. CONEXIÓN DE LA TARJETA DE RADIOFRECUENCIA Y LA TARJETA CÉLULA FOTOVOLTAICA	10
6. CONEXIÓN DE DE LA TARJETA SENSOR A LA TARJETA DE RADIOFRECUENCIA	10
7. PUESTA A PUNTO DE LAS BATERÍAS	11
8. COLOCACIÓN DEL TRANSMISOR DE RADIOFRECUENCIA	11
PUESTA EN MARCHA Y USO.....	12

Lista de dispositivos

1. Emisor de potencia RF



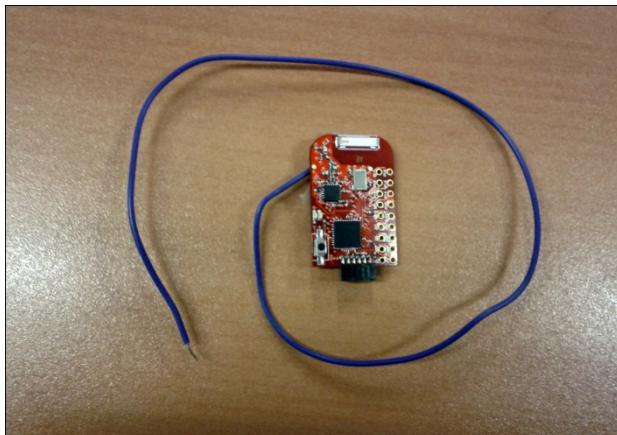
2. Alimentador de transmisor



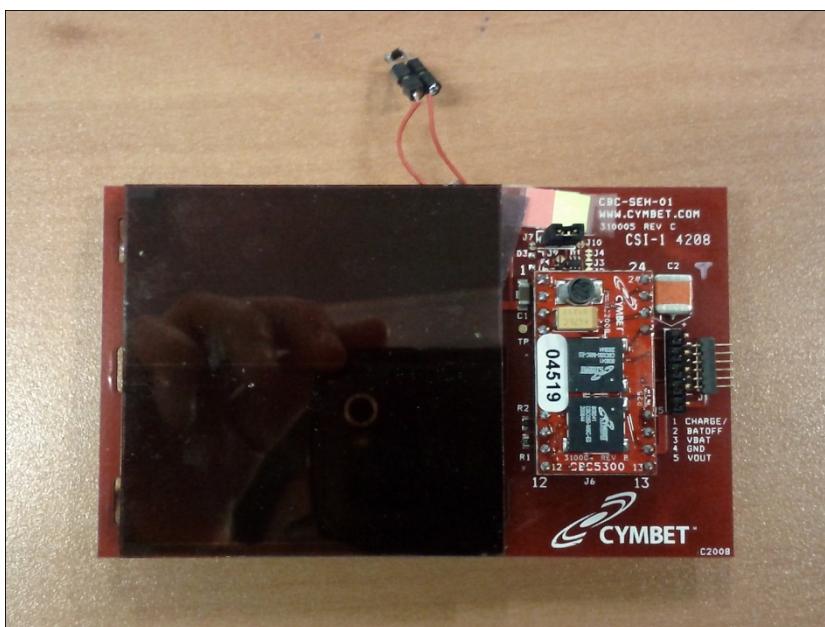
3. Receptor USB



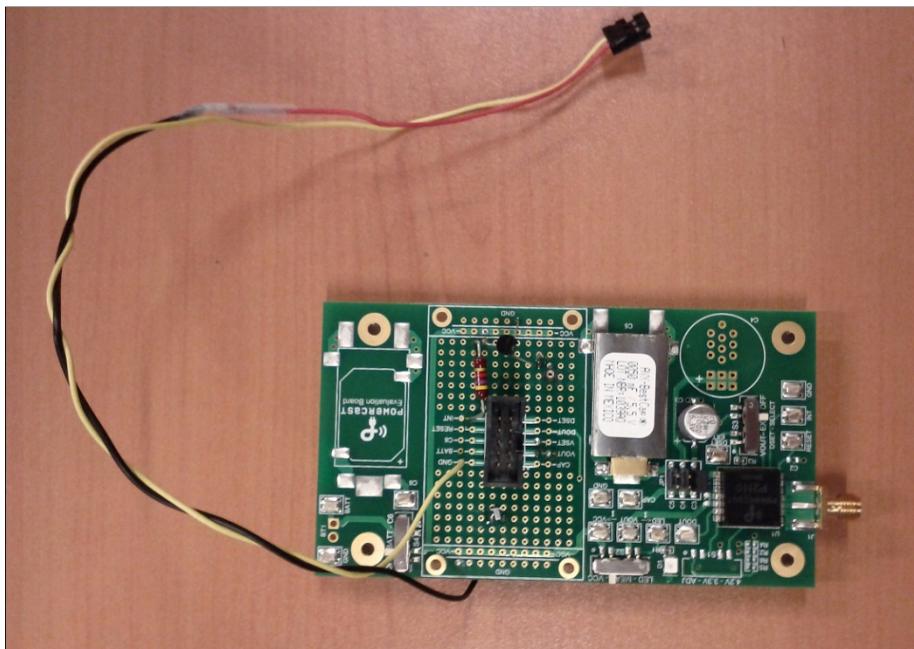
4. Tarjeta sensor



5. Tarjeta célula fotovoltaica



6. Tarjeta recepción de radiofrecuencia



7. Antena de radiofrecuencia



8. CD software

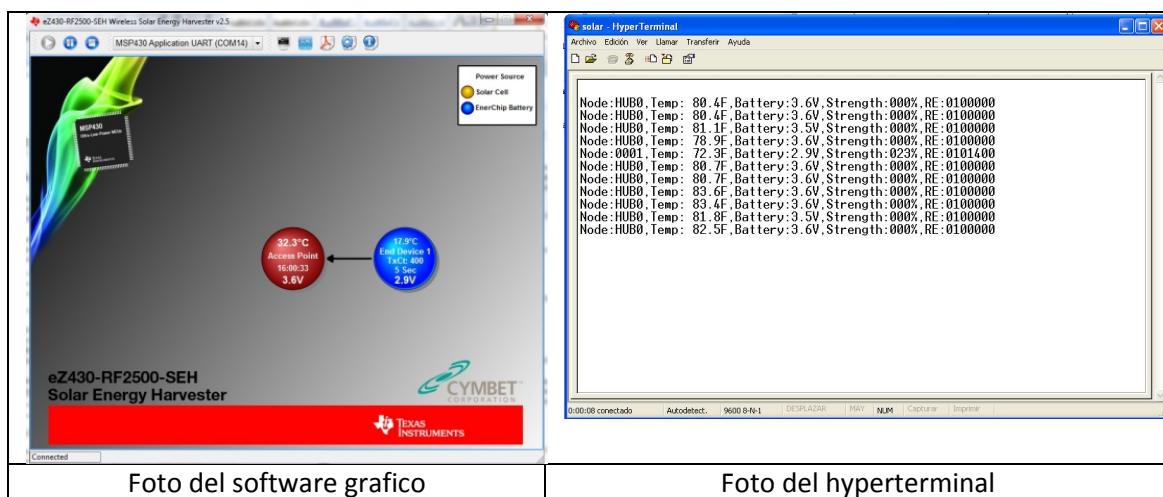


Instalación

1. Instalación del software

En el CD-ROM se encuentra el software necesario para mostrar en el PC la información proveniente del sensor de temperatura a través del receptor USB. Este *software* es totalmente compatible con Windows XP y Windows 7.

El *software* proporciona una interfaz gráfica y amigable para la interpretación de la información transmitida por el sensor, pero aunque cualquier PC con drivers para dispositivos USB con comunicación serie es capaz de mostrar los datos a través de un hyperterminal.



Instalación del software de interfaz gráfica

1. Introducir el CD-ROM en un ordenador Windows XP o 7
2. Explorar la unidad de CD-ROM hasta el directorio “[unidad de CD]:\software\”
3. Ejecutar el instalador SEH-demo-setup.exe
4. Seguir las instrucciones hasta finalizar la instalación

Una vez instalado el Software gráfico podremos ejecutarlo haciendo clic en el acceso directo que aparece en el escritorio



Configuración del hyperterminal

Si el ordenador tiene drivers para dispositivos USB con comunicación serie, al conectar el receptor USB se le asignará un puerto COM. La configuración del hyperterminal deberá ser:

- Baudrate: 9600
- Data bits: 8
- Stop bits: 1
- Parity: none
- Flow control: none

2. Conexión del receptor USB y el alimentador del transmisor

El receptor USB tiene un conector de dos pines para controlar la alimentación del transmisor. Para conectarlos de deberá introducir el cable verde en el conector con etiqueta verde y el cable negro en el conector con etiqueta negra.



Foto del la conexión en el receptor USB

3. Conexión del circuito de control al emisor de radiofrecuencia.

El circuito de control se conecta con el transmisor de radiofrecuencia mediante el cable rojo y negro que acaba en un conector jack 2.5" de alimentación. Cualquiera de los dos conectores hembra del transmisor sirve para su alimentación.



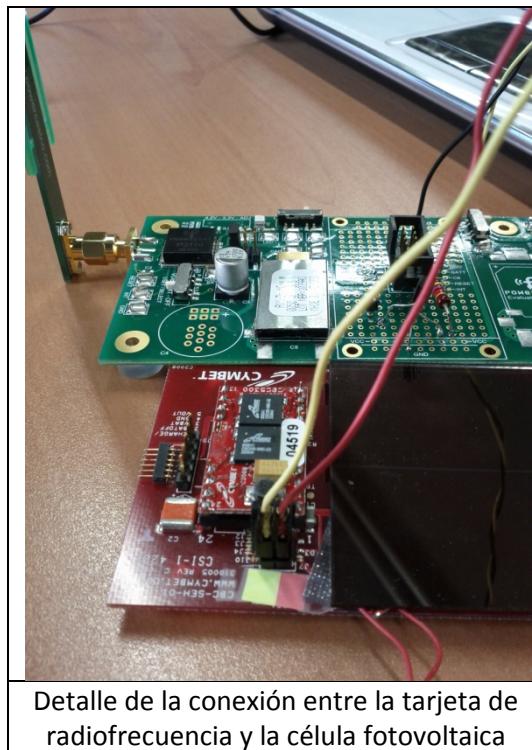
Conexión de la alimentación del emisor

4. Conexión de la antena a la tarjeta de recepción de radiofrecuencia.

En un lateral de la tarjeta verde se encuentra un conector mini NBC al que hay que conectarle la antena de radiofrecuencia.

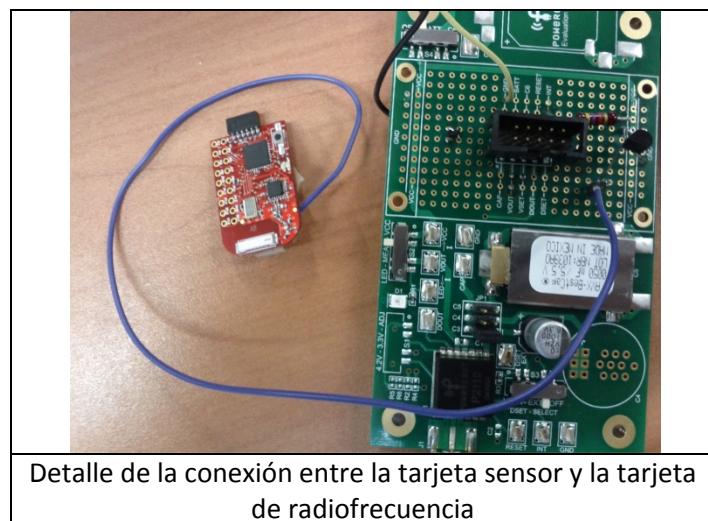
5. Conexión de la tarjeta de radiofrecuencia y la tarjeta célula fotovoltaica.

Para conectar el cable rojo y amarillo que une la tarjeta de radiofrecuencia y la célula fotovoltaica primero habrá que quitar el jumper que se encuentra en la tarjeta fotovoltaica y después conectar en ese lugar el cable que sale de la tarjeta de radiofrecuencia.



6. Conexión de la tarjeta sensor a la tarjeta de radiofrecuencia.

El cable morado que sale de la tarjeta de sensores se debe conectar en el conector de la tarjeta de radiofrecuencia como se indica en la foto:



7. Puesta a punto de las baterías.

El sensor de temperatura debe arrancar con las baterías cargadas a un alto nivel, por lo que antes de realizar su puesta en marcha se deberá dejar la célula fotovoltaica durante un periodo de 5 minutos expuesta directamente a la luz solar o durante media cerca de una fuente de luz artificial.

8. Colocación del transmisor de radiofrecuencia.

El transmisor de radiofrecuencia deberá colocarse colgado de una pared a media altura entre el suelo y el techo. Deberá estar colocado completamente vertical con el LED de indicación de funcionamiento hacia afuera.

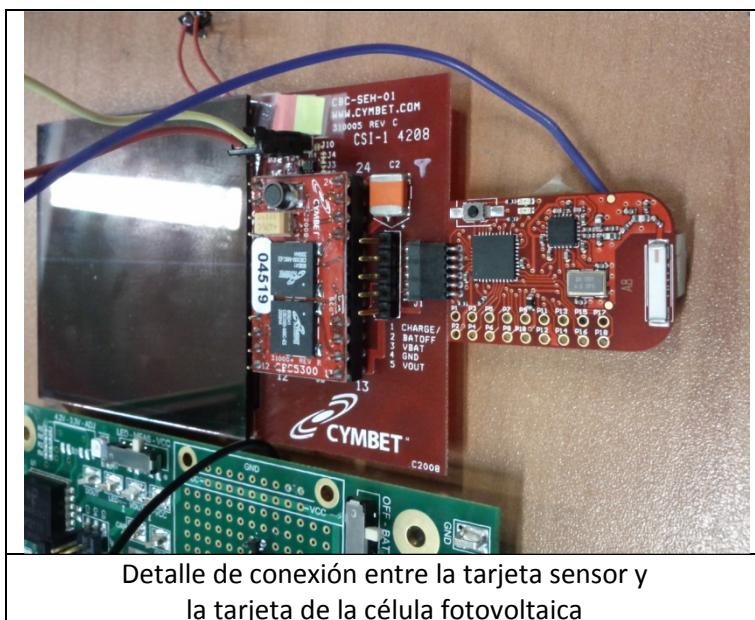
Puesta en marcha y uso

Una vez Instalados todos los componentes del sistema, para ponerlo en marcha se deben seguir los siguientes pasos:

1. Conectar el alimentador del transmisor a una toma general corriente (230V AC).
2. Conectar el receptor USB a un ordenador con el software de monitorización de sensores instalado.
3. Arrancar el programa de PC “eZ430-RF2500 SEH Sensor Monitor” (el círculo rojo debe parpadear).

Para que el sensor arranque debe tener su batería cargada. Para ello se deberá colocar la célula fotovoltaica expuesta directamente a la luz solar durante 5 minutos, o cercana de algún foco de luz artificial durante media hora.

4. Por último, se conectará el circuito sensor a la tarjeta de la célula fotovoltaica como se indica en la foto:



En ese momento, en el programa “Sensor Monitor” deberá aparecer un círculo que represente al sensor. En el caso de no aparecer, o con conseguir una conexión estable, desconectar la tarjeta sensor de la célula fotovoltaica y repetir el proceso de carga.

La información que muestra el sensor es la siguiente:

- El estado de carga: si el sensor está siendo recargado (por la célula solar o por RF) en el instante de la transmisión el círculo es amarillo. Si por el contrario el sensor está siendo alimentado por la energía de la batería el círculo es azul.
- La tensión de alimentación: nos sirve para hacernos una idea de la carga de la batería.
- La temperatura ambiente alrededor del dispositivo.