

Protocolo para comunicación inalámbrica en instalaciones de energías renovables

Félix Sasián^a, Ricardo Theron^b, Diego Gachet^{c,*}

^a Departamento de Ingeniería, Desing3 SL, Recinto Interior Zona Franca Nave 1-A1, Cádiz, España

^b Carbon Management - Solar Energy, Research & Development Center, Saudi Aramco, Dhahran, Saudi Arabia

^c Universidad Europea de Madrid. UEM. Dpto. Sistemas Automáticos y Automática. Calle Tajo, s/n – 28670 Villaviciosa de Odón.

Resumen

Durante estos últimos cuatro años, la industria fotovoltaica (FV) ha tenido que enfrentarse a su primer proceso de consolidación, debido, entre otros factores, a la crisis económica. En esas circunstancias, la FV tiene la necesidad vital de reducir los costes. Una nueva línea de trabajo, la electrónica de potencia empotrada a nivel de módulo (MLPE Module Level Power Electronic), está en plena expansión y promete aumentar no solo la eficiencia sino también la flexibilidad y la seguridad de los sistemas fotovoltaicos. No obstante, una solución óptima de MLPE dependerá de la gestión eficaz de la comunicación de datos. Desafortunadamente, hoy en día no existe un protocolo estándar abierto que presente las características deseadas para este fin. En este artículo se propone una solución de comunicaciones basada en un protocolo robusto, seguro y fácil de implementar sobre un pequeño microcontrolador, enfocado a sistemas de ultra bajo consumo y que, por el hecho de estar orientado a mensaje y evitar la fragmentación de la información, permite anchos de banda bajos y entornos con alto nivel de ruido. Sobre todo, dicho protocolo aporta una solución para estandarizar la comunicación entre los distintos equipos que contempla una instalación FV (independientemente de su tipo y tamaño). Finalmente, el protocolo propuesto se puede extender a sistemas de micro-generación eólica o hidráulica y/o a sistemas de monitorización remota.

Palabras Clave: Energías renovables, fotovoltaica, comunicación inalámbrica, protocolo.

1. Introducción

A partir del 2010, la joven industria FV se enfrenta a su primera crisis de reestructuración / consolidación / diversificación (conocida como el “Solar Shakeout” en FV) debido al cúmulo de los efectos de los siguientes factores:

- Una oferta escasa de polisilicio (2005-2007) y una gran demanda de módulos FV (2006-2008), seguido de una sobrecapacidad productiva en los mismos sectores (2009-2010).
- En varios países, incluyendo España, incentivos gubernamentales desorbitados que, por una parte provocaron especulación financiera y exceso de financiación de las empresas FV debido a grandes beneficios alcanzados en el negocio de los parques FV (a veces 20% anuales garantizados por el gobierno sobre 20 o 25 años), y por otra permitieron un * margen de beneficio excesivo obtenido por los productores de módulos FV y de polisilicio.
- La crisis financiera que azotó los mercados reduciendo la disponibilidad del capital necesario para la realización de grandes parques FV y asimismo afectó a la refinanciación de las empresas,

concretamente a las más recientes, y que también provocó el reajuste de los incentivos gubernamentales.

Los efectos fueron dramáticos tanto a nivel de cierre de empresas (NRGBUZZ, 2013) como a nivel de precio medio de venta (ASP) del Vatio pico (W_p) que, en apenas 2 años (Q42010-Q42012) se redujo a 1/3 de su valor (Greentechsolar, 2013).

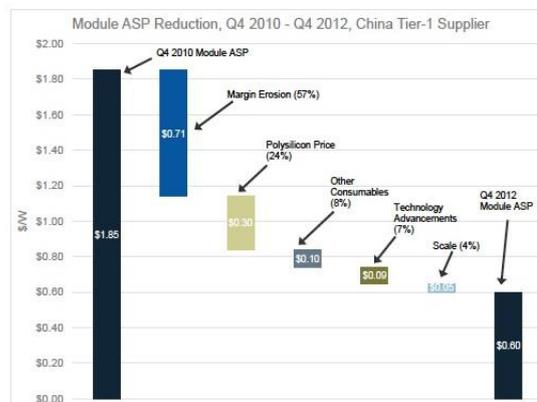


Figura 1: Reducción del precio medio de venta de módulos fotovoltaicos Q4 2010 - Q4 2012 (Greentechsolar, 2013).

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: felix.sasian@desing3.com (Sasián, Félix), ricardo.theron.basta@icloud.com (Theron, Ricardo), gachet@uem.es (Gachet, Diego)

El efecto se puede apreciar de manera global en la curva de tendencia del precio medio de venta (ITRPV 2014 Rev. 1., 2014), de manera “natural”, el precio del W_p debería disminuir de 21,5%

cada vez que la potencia instalada se duplica. Por las razones antes expuestas, hubo primero un aumento artificial de los precios seguido de una caída en picada de los mismos hasta finales del 2012, mientras que en el 2013, los precios se han recuperado ligeramente (último punto de la gráfica).

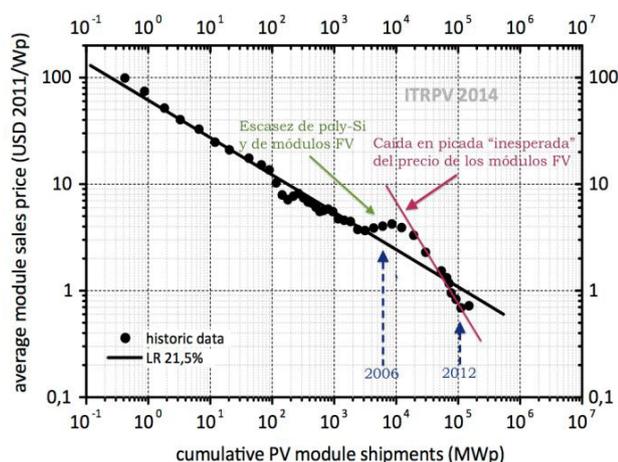


Figura 2: Tendencia del precio medio de venta del módulo frente a la potencia demandada (ITRPV 2014 Rev. 1., 2014). Anotaciones a color por los autores.

En España, aunque se estableció que las medidas de austeridad no afectarían a las instalaciones FV que previamente tenían fijadas las tarifas con carácter retroactivo, se ha comenzado a aplicar un límite al número de horas anuales que estarán bonificadas (Real Decreto-ley 14/2010, 2010).

Esta supresión generalizada en el apoyo del gobierno y la nueva ley aprobada por el Parlamento por la cual a partir de 2013 se crea un nuevo impuesto del 7% sobre los productores de electricidad, junto con la crisis económica, tiene dos efectos importantes en el sector fotovoltaico, por un lado el número de nuevas instalaciones sobre suelo se ha reducido drásticamente y por otro, las instalaciones existentes tienen que buscar nuevas formas de operar y mantener las instalaciones a fin de poder alcanzar una mínima rentabilidad.

En este nuevo escenario ha cobrado vital importancia el disponer de nuevas tecnologías que permitan, por un lado aumentar la eficiencia de las instalaciones de producción de energía fotovoltaica y por otro disminuir los costes de instalación. Con estos objetivos han comenzado a desarrollarse soluciones basadas en micro-inversores y en optimizadores dc/dc que se implementan a nivel de módulo, esta nueva tecnología se conoce como MLPE (Pickerel, 2013) y actualmente es uno de los sectores de mayor desarrollo y de más crecimiento en la industria fotovoltaica.

Estos nuevos productos representan un cambio dramático de estrategia respecto a las soluciones tradicionales al distribuir la gestión de la energía en los denominados módulos inteligentes.

Los equipos MLPE tienen el potencial de mejorar la disponibilidad de la red y de incrementar la cantidad de energía total producida en los sistemas fotovoltaicos además de reducir el coste por Vatio del inversor y de disminuir el coste de conexión eléctrica debido al ahorro, entre otras cosas de cajas de interconexión, por ello son esenciales para integrar grandes cantidades de energía renovable a la red.

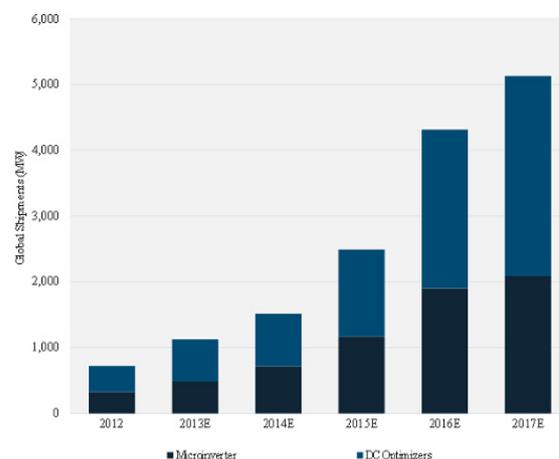


Figura 3: Mercado actual (2012-2013) y previsiones (2014-2017) de la electrónica de potencia a nivel de módulo por tecnología. (GTM Research, 2014).

Puesto que desaparece la centralización hasta ahora existente en los sistemas fotovoltaicos, en los que un número reducido de inversores que producían el total de energía van a ser sustituidos por un elevado número de micro-inversores u optimizadores dc/dc a nivel de módulo, resulta imprescindible disponer de un sistema de información que permita no sólo monitorizar el estado individual de cada uno de ellos, sino que sea capaz de enviar órdenes a los mismos. La monitorización remota de las instalaciones no sólo permite conocer en tiempo real el estado operativo y los parámetros de producción, sino que permiten realizar un mantenimiento predictivo mediante el análisis de los datos almacenados a lo largo del tiempo. Como parte de esos sistemas de monitorización, se requieren mecanismos que tiendan a la estandarización, a la seguridad, a la fiabilidad y, por tanto, al ahorro económico.

Resulta evidente que al aumentar el número de equipos a monitorizar, se hace necesario disponer de un sistema de comunicación inalámbrica que permita simplificar la instalación y reducir los costes asociados a la misma y, por tanto, se requiere de un protocolo de comunicaciones acorde a esta tarea.

2. Protocolos Inalámbricos en Instalaciones Fotovoltaicas

Existen en la actualidad un amplio número de especificaciones de protocolos de alto nivel para entornos inalámbricos, muchos de ellos basados en el estándar IEEE 802.15.4 (IEEE 802.15, 2014), como es el caso de ZigBee (zigbee, 2016) (Vishwakarma, 2012) o Miwi (Microchip MiWi™ Stack, 2010), que han sido desarrollados para usar en la banda ISM teniendo en cuenta el bajo consumo, la seguridad y un rango de uso por debajo de los 100 metros. Además, son varios los fabricantes que han aportado soluciones similares sobre Bluetooth (Bluetooth, 2014) o Wifi (IEEE 802.11: Wireless LANs, 2014).

Algunos fabricantes incluso proponen soluciones propietarias (Clinic Solar System, 2014) (rfisolar, 2016) que permitirían adoptar tecnologías inalámbricas a instalaciones ya existentes.

Aun disponiendo de esta variedad de opciones, hay que tener en cuenta los siguientes factores cuando se pretende emplear alguna de ellas para el fin descrito:

- Coste de la solución.
- Necesidad de pagar canon o royalties por el uso.
- Necesidad de usar un hardware de un fabricante específico para obtener la licencia de uso.
- Cantidad de recursos usados.
- Consumo energético.
- Marco de aplicación.

Diferentes autores realizan comparaciones de estos protocolos en diferentes aspectos. Tanto Potorti (Potorti, 2005), Lee (Jin-Shyan Lee, 2007) como Katare (Katare, 2012) comparan las diferentes características y comportamientos de acuerdo a diferentes métricas, incluyendo capacidad, topología, seguridad, calidad del servicio y consumo de energía.

Tabla 1: Comparativa de los protocolos Zigbee, Bluetooth y WIFI.

	Zigbee	Bluetooth	Wifi
IEEE	802.15.4	802.15.1	802.11a/b/g
Frecuencia	868/915 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Velocidad	250 Kb/s	1 MHz	50 MHz
Distancia	100 m	10 m	100 m
Canales	16	79	14 (2.4 GHz)
Ancho de banda	0.3 MHz	1 MHz	22 MHz
Máximo número de nodos por red	65000	8	2007
Integridad	CRC 16	CRC 16	CRC 32
Encriptación	AES	E0 stream cipher	RC4 stream cipher (WEP), AES block cipher
Consumo	~1-10 mW	~40–100 mW	> 160mW

Baker (Baker, 2005) analiza las fortalezas y debilidades para su uso en aplicaciones industriales y concluye que Zigbee sobre 802.15.4 puede cubrir una mayor variedad de aplicaciones industriales debido al consumo, rango de aplicación y flexibilidad de la arquitectura.

Aunque diversos autores (Martín E. Andreoni López, 2012) (An-Kyu Lee, 2014) (Wang Huan, 2013) coinciden con las conclusiones de Baker (Baker, 2005) en la elección de Zigbee como protocolo para la monitorización de sistemas industriales, y por tanto aplicables al sector fotovoltaico, dadas las características requeridas para los mismos, como son la no necesidad de una alta tasa de transferencia de datos y el bajo consumo y presentan soluciones basadas directamente sobre este protocolo, es importante destacar las siguientes reflexiones respecto a Zigbee:

- En la mayoría de micro instalaciones, todos los equipos estarían dentro del rango de alcance directo y, por tanto, no es necesario el uso de redes MESH (malla), que impiden implementar técnicas de ahorro de energía.
- Aunque el número de nodos en una red pueda ser tan elevado, en la práctica, para un determinado número de paquetes/minuto ese límite viene determinado por el tamaño del paquete, debido al tiempo necesario para enviarlo, y por el tiempo necesario para el procesamiento de la información por el nodo receptor, además del tiempo empleado para retransmitir paquetes de otros nodos.
- Aunque provee interoperabilidad entre fabricantes, eso sólo garantiza que la información se puede enviar, pero no que el destinatario sepa interpretarla.

- Es necesario pagar un canon por usarlo en aplicaciones comerciales.

Existe otra línea de investigación en el ámbito de los protocolos enfocados a las redes de sensores que también requieren muy bajo consumo, pero en éstos priman las técnicas de enrutado de datos sobre el resto de características (Luis Javier García Villalba, 2009) (Neha Rathi, 2012), no siendo, por tanto, una opción adecuada al sector fotovoltaico. Otra opción a considerar sería Miwi, que es una solución propietaria desarrollada por Microchip (Microchip, 2016) basada en el IEEE 802.15.4, que podríamos considerar como un subconjunto de las especificaciones de Zigbee, simple de implementar pero que requiere de transceptores y micro controladores fabricados por Microchip para poder ser usada en un proyecto de forma libre.

Por tanto, se propone un protocolo ligero, que denominamos DBWP (Dictionary Based Wireless Protocol) que está basado en IEEE 802.15.4 como Zigbee o Miwi y, por tanto, permite usar el mismo hardware, pero que, además de estar enfocado específicamente para la monitorización de sistemas de energías renovables, está orientado a mensajes y es libre.

3. Solución Propuesta

Con el objetivo de obtener un sistema de comunicaciones robusto, económico, simple de implementar y, que la vez permita una estandarización en la adquisición de datos de todos los elementos que forman parte de una instalación fotovoltaica, se ha realizado un trabajo de investigación conducente al diseño de un protocolo que cumpla con los requisitos antes mencionados, basado en transceptores que cumplen con la norma IEEE 802.15.4 y que aporte ventajas en cuanto a simplicidad y bajo consumo frente al resto de soluciones analizadas basadas en este estándar cuando se necesitan realizar pico-redes de no más de 254 elementos, por tanto, se plantea una alternativa enfocada a un campo específico de aplicación.

Se ha optado por un protocolo orientado a mensajes, en el que la información a intercambiar se descompone en mensajes a los que se les asigna una dirección de origen, una dirección de destino, un objeto, que define la información que se quiere transmitir, y un número de secuencia único que permite su seguimiento y reconocimiento. Cada uno de los mensajes individuales dispone por sí mismo de toda la información necesaria para que el receptor pueda interpretar los datos u órdenes que contiene, esto implica que una unidad de información no se fragmenta en múltiples paquetes haciendo que este protocolo sea eficiente y seguro para ser usado en entornos inalámbricos donde siempre se está expuesto a interferencias externas.

Cada nodo en la red organiza sus datos, al igual que otros protocolos, de forma ordenada en un diccionario de manera que, puesto que en el propio mensaje se especifica el tipo de nodo que ha transmitido el mensaje, el interlocutor puede interpretar correctamente la información. Del mismo modo es posible solicitar información concreta o ejecutar comandos conociendo el tipo de nuestro interlocutor ya que, como se ha comentado, la organización de la información en el diccionario de cada tipo de nodo es conocida.

El protocolo dispone de un sistema opcional de ‘acuse de recibo’ que permite al emisor confirmar que la información ha sido recibida por su interlocutor si el sistema que se está implementando lo requiere. También es posible hacer uso de un

sistema de encriptación que asegura la confidencialidad de los datos y que sólo aquellos interlocutores que conozcan la clave de la red puedan acceder a la misma.

Dada la naturaleza del protocolo, el usuario final puede implementar dos modelos de comunicación:

- Maestro/esclavo
- Productor/Consumidor

Existe un tipo especial de mensaje denominado baliza, que los nodos pueden enviar periódicamente y que contiene la información más relevante del nodo (definida también en el diccionario). En un modelo productor/consumidor esta baliza permite a un nodo tanto activo como pasivo acceder a la información relevante de cada nodo.

3.1. Topología

La naturaleza del protocolo permite a cualquier nodo transmitir y recibir información, de manera que cualquier integrante en la red puede enviar información que reciben el resto de participantes permitiendo la comunicación tanto punto a punto (unicast) como punto a multipunto (broadcast). La implementación lógica habitual constaría de un coordinador que controla a uno o varios nodos terminales que suelen jugar un rol pasivo estando a la espera de recibir órdenes del controlador, aunque también es posible implementar un sistema multi-maestro e incluso uno en el que no exista ningún coordinador ya que los diferentes nodos tienen la capacidad que capturan información de forma pasiva sin interferir con el emisor/receptor de los mensajes basados en el modelo productor/consumidor.

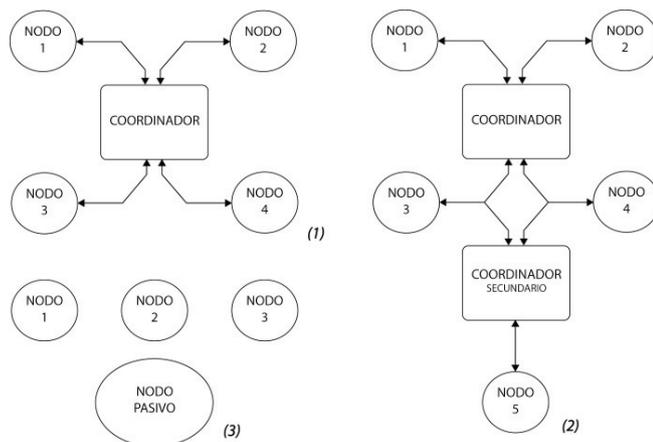


Figura 4: Topologías aplicables al protocolo DBWP (1) esquema tradicional con un coordinador en la red encargado de gestionar toda la comunicación. (2) Sistema multi-coordinador, en el que algunos nodos pueden ser gestionados por más de un coordinador. (3) esquema productor-consumidor en el que los diferentes nodos producen información que cualquier estación puede usar en modo pasivo, esto es, sin que exista un enlace entre ellos.

En esta primera versión del protocolo no se ha implementado la capacidad de enrutado de mensajes para permitir topologías MESH, ya que el objetivo principal del mismo es disponer de un sistema simple, que pueda ser ejecutado en micro controladores con pocos recursos de memoria y capacidad de proceso y que, sobre todo, puedan hacer uso de técnicas de ahorro de energía que impedirían la implementación de dicha capacidad de enrutado.

Por otra parte el ámbito de aplicación de este protocolo no hace necesario en principio disponer de esta capacidad.

Como se ha mencionado anteriormente, se soportan las topologías estrella y punto a punto. En el caso de la estrella todos los nodos están conectados a un coordinador central que puede establecer comunicación en cualquier momento con cualquiera de los nodos para solicitar o enviar información y los nodos no pueden comunicarse directamente entre ellos sino a través del coordinador, que, además se encarga de gestionar los tiempos en la red, mientras que con punto a punto los diferentes nodos pueden intercambiar información directamente entre ellos sin la intervención de un coordinador. En ambos casos los nodos pueden también enviar mensajes al coordinador para indicar la ocurrencia de un evento o como baliza que se envía de forma periódica si el coordinador no interroga a un nodo durante un determinado tiempo predefinido. Una característica importante es poder implementar un modelo de comunicación productor-consumidor, en el que los nodos difunden su información de forma periódica para aquellos otros integrantes de la red que estén interesados en ella.

La propuesta para el uso de este protocolo, en aquellas instalaciones donde el número de nodos sea superior a 254 o donde las distancias sean superiores al alcance de los transeceptores, consiste en dividir la red en diversas subredes, donde un coordinador sería el encargado de gestionar un grupo de nodos y enviar la información a un nivel superior, bien sea mediante cableado o de forma inalámbrica, pero usando un protocolo que permita un mayor ancho de banda, de manera que un incremento en el número de nodos y, por tanto, en el número de coordinadores no disminuya el ancho de banda total tal y como pasaría si se usara Zigbee.

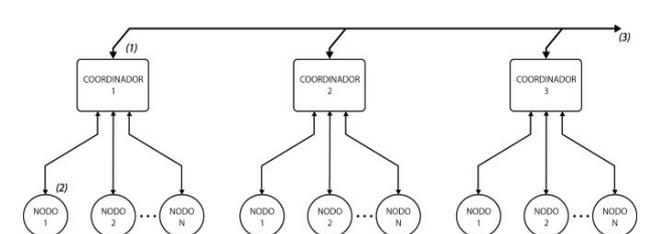


Figura 5: Topología propuesta para usar con DBWP. (1) Cuando el tamaño de la red lo requiera, se puede emplear el número de coordinadores necesarios, que gestionaría cada uno un determinado número de nodos (2). Los coordinadores se encargarían de enviar la información al nivel superior (3) bien sea de forma inalámbrica o cableada.

3.2. Organización del Protocolo

Se ha estandarizado la definición del protocolo en una división por capas, de manera que el mismo protocolo se puede encapsular sobre diferentes medios físicos. Esta división consiste en las siguientes capas:

- Capa física que define como se transmite la información sobre un medio físico.
- Capa de control del acceso al medio que delimita y reconoce los mensajes.
- Capa de red, que en conjunto con la MAC se encarga de gestionar los destinos de los mensajes, así como de detectar los diversos tipos de paquetes, como broadcast o unicast.

- Capa de aplicación que es la de más alto nivel y gestiona el acceso, empaquetado e interpretación de los objetos del diccionario.

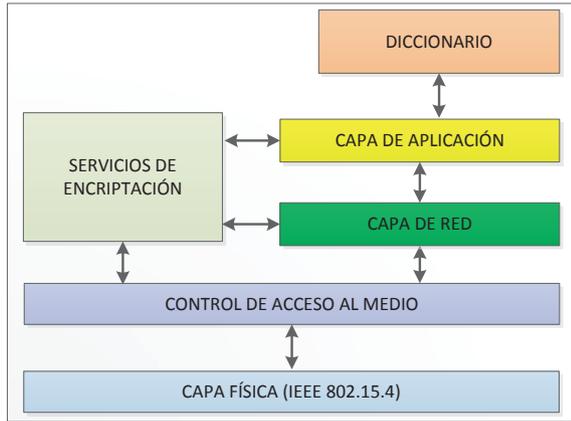


Figura 6: Arquitectura del protocolo. La capa física corresponde al estándar IEEE 802.15.4, lo que permite usar los mismos transceptores que para el resto de protocolos basados en él.

Existe además un servicio de encriptación que se encarga de proveer los mecanismos de seguridad a las diversas capas si éstos son necesarios, si bien las diferentes funciones de encriptación pueden ser provistas de forma externa por un desarrollador que quisiera implementar otro nivel de seguridad o usar sus propios algoritmos.

3.3 Capa Física

La capa física (PHY) es la fundamental por debajo del resto de capas y define como se transmite la información sobre un medio físico, en este caso mediante una conexión inalámbrica que usa pequeños módulos radio de muy bajo consumo en la banda ISM (industrial, científica y médica), que está disponible de forma libre en todo el mundo. El espectro se divide en 16 canales disponibles y una longitud máxima del paquete de 127 bytes, incluyendo un CRC (CRC) de dos bytes de longitud.

La banda elegida es concretamente la de 868.0 - 868.6 MHz por ser la autorizada y regulada para Europa (ETSI, 2012), el ancho de banda total para la banda ISM es, en teoría, de 250 kbps aunque para una comunicación fiable se opta por reducir este valor a 20 kbps, aunque es posible que el usuario pueda modificarlo de acuerdo a las necesidades específicas de la aplicación. También queda a disposición del usuario la elección la frecuencia de trabajo, si bien se dispone de herramientas que permiten realizar un análisis del espectro a fin de poder seleccionar una frecuencia con poco ruido.

El transceptor usado en este trabajo es el MRF89XA (MRF89XA) fabricado por Microchip® que dispone como características principales la alta integración del mismo, que permite su uso con sólo unos pocos componentes adicionales y el bajo consumo (3 mA en modo RX, 25 mA en Modo TX y 0.1 uA en modo sleep).

El MRF89XA dispone de un sintetizador de frecuencia controlado por un cristal externo de 12.8 MHz y el rango de frecuencias es 863-870 MHz. Emplea una arquitectura superheterodina, la primera frecuencia intermedia (IF1) es un noveno de la frecuencia RF

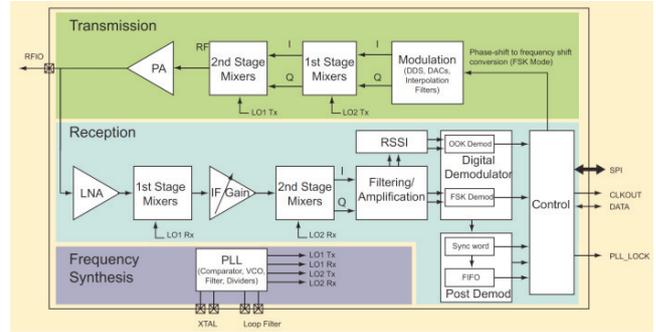


Figura 7: Diagrama de bloque simplificado del MRF89XA.

Después de una segunda conversión, que depende del modo de recepción, la frecuencia seleccionada es filtrada y amplificada a un nivel adecuado para la demodulación, que puede ser FSK (Frequency Shift Keying) u OOK (On Off Keying).

El MRF89XA se controla mediante un bloque digital que incluye registros para almacenar la configuración de la radio. A estos registros el micro controlador accede a través de un puerto SPI (interfaz serie paralelo).

La capa física es usada por este transceptor para sincronizar la comunicación y asegurar la viabilidad de la misma. Los mensajes se envían mediante el formato de longitud variable, en el que la longitud de los datos a enviar no es siempre fija y no se conoce con antelación, por ello es necesario enviar la información de la longitud del mensaje de modo que el receptor pueda operar correctamente.

Un paquete estará formado por la siguiente trama:

CAPA	PHY		MAC			
Bytes:	4	4	1	4	variable	2
	Preámbulo	Trama de Sincronismo	Número de bytes	MAC Header	Datos	CRC

Las funciones individuales de la capa física son:

Preámbulo: se usa para sincronizar la comunicación, en este caso está formado por 4 bytes con el patrón 0b10101010. Para diferentes transceptores no sólo este patrón, sino incluso la longitud del preámbulo pueden ser diferentes.

Trama de sincronismo: formada de 4 bytes de longitud y que se usa junto con el preámbulo para identificar la llegada de los datos. Además puede ser utilizada para filtrar aquellas tramas de datos que no coincidan con el patrón pre configurado, de manera que es una forma de identificar o aislar diferentes grupos de transceptores en una misma ubicación. Esta característica permitiría dividir un número determinado de nodos en grupos diferenciados sin relación entre ellos, permitiendo la coexistencia de varias redes incluso en el mismo canal.

Número de bytes: Puesto que el sistema de transmisión usado es de longitud variable, este byte indica la longitud de los datos a enviar o recibir.

Este formato de mensajes, unido al uso de un transceptor especializado, comparado con el resto de protocolos basados en IEEE 802.15.4 provee ventajas cuando se emplea en pico-redes ya que el filtrado de paquetes se realiza en el transceptor, de manera que sólo van a pasar al micro controlador aquellos mensajes dirigidos a la dirección del nodo en cuestión o los

mensajes tipo broadcast si el nodo se hubiera configurado para recibirlos.

3.4 Capa MAC

Es la encargada de delimitar y reconocer los mensajes, así como de proveer los mecanismos de direccionamiento en la red en conjunto con la capa de red.

El sistema de direccionamiento está formado por un identificador único a nivel de red compuesto por un byte, este sistema de identificación permite redes de hasta 254 nodos. Al realizar el filtrado de paquetes en el propio transceptor, se descarga al microcontrolador de esta tarea y se reduce drásticamente el consumo de energía y la complejidad del código y permite, además, hacer uso de técnicas de ahorro de energía en el microcontrolador sin dejar de atender la radio.

MAC HEADER						
Bytes:	1	1	1	1	variable	2
	Dirección Destino	Dirección Origen	Control de Trama	Número de secuencia	Datos	CRC

El byte de control de trama tiene cinco campos que controlan los diferentes aspectos de la capa MAC.

Control de Trama					
Bits:	3	1	1	1	2
	Tipo de trama	Broadcast	Encriptado	Ack Request	Reservado

La descripción detallada es:

Tipo de trama: el campo de 3 bits *tipo de trama*, indica cómo interpretar el paquete, ya que establece qué orden o acción se está solicitando o enviando en el mensaje. Los posibles tipos están definidos por el protocolo, aunque se dispone de dos opciones que podrían ser usadas de manera propietaria por el usuario.

Tabla 2: Posibles tipos de trama.

Tipo	Descripción	Número de bytes	Campo de Datos
0b000	El mensaje contiene datos del diccionario	Variable	Objeto del diccionario
0b001	El interlocutor solicita datos del diccionario	1	Índice solicitado
0b011	El interlocutor escribe datos en el diccionario	Variable	Objeto del diccionario
0b010	Envío de acuse de recibo	1	Numero de secuencia del interlocutor
0b100	Envío de error	1	Número de error
0b101	Envío de evento	1	Número de evento

Broadcast: El campo de 1 bit especifica si el paquete es para un destinatario en concreto (Unicast, valor 0b0) o es una difusión (Broadcast, valor 0b1). Caso de ser un mensaje de difusión existen dos niveles para ello, por una lado puede ser un mensaje de difusión global, que será recibido por todos los integrantes de la red y que está definido mediante el valor 0x00 en la dirección de destino y, por otro lado se puede lanzar un mensaje de difusión dirigido a aquellos nodos que implementan un nivel jerárquico superior y que se definen por un valor de 0xFF como dirección de

destino. Este mecanismo es parte del sistema de ahorro de energía y simplicidad del código, ya que de nuevo es el transceptor el que se encarga de filtrar los paquetes que pasarán al microcontrolador.

Encriptado: el campo de 1 bit indica si el mensaje transmitido se ha codificado usando un sistema de clave simétrica. Solamente se encripta la parte de la trama correspondiente a los datos. Aunque la longitud de la trama puede cambiar tras ser sometida al proceso de encriptación, esa variación queda contemplada en el campo número de bytes de la capa física.

Ack Request: el campo de 1 bit indica que el interlocutor ha solicitado un acuse de recibo a la recepción de este mensaje. En este protocolo se ha optado por no enviar el ACK de forma automática y, por tanto, se pasa a la capa de aplicación para que se gestione, ya que el envío automático de la confirmación no garantiza que los comandos u mensajes recibidos se hayan ejecutado o interpretado de forma correcta.

Número de secuencia: es un número que se incrementa en cada mensaje y que sirve para identificarlo a efecto del mecanismo de reconocimiento de recepción de paquetes y de envío de errores relacionados con los mismos. Este número se establece a un valor aleatorio al inicializar el sistema.

Datos: en este campo de tamaño variable se encapsula el objeto del diccionario según se indica en la tabla y que define la información que se intercambia con el interlocutor así como la forma de interpretarla. Una de las ventajas de este mecanismo es que el propio objeto contiene la información necesaria para poder interpretar su contenido. Es ésta la información que se puede pasar a una capa superior para su uso.

CRC: El algoritmo de redundancia cíclica *CRC 16* se emplea para garantizar la integridad del mensaje, el CRC se calcula con los bytes del mensaje y se añade al final de la trama, al recibir un mensaje se calcula de nuevo el CRC y se compara con el valor que incluye el propio mensaje, si son iguales el mensaje se acepta, caso contrario simplemente se descarta. Este control del CRC de los mensajes se realiza de nuevo en el transceptor liberando de esta tarea al micro controlador, ya que si un mensaje no pasa la verificación del CRC el propio transceptor lo descarta sin que tenga que intervenir el microcontrolador.

Es posible encapsular también la capa MAC sobre cualquier otro medio como Ethernet o USB para, por ejemplo, conectar la red inalámbrica a un nivel de control superior a través de un enrutador.

3.5. Diccionario

El diccionario es un conjunto ordenado de objetos, direccionado por un índice de 8 bits y de no más de 40 bytes de información cada uno. Además cada objeto dispone de un campo de 1 byte que define el *Tipo*, un campo de 1 byte que define la *Versión* del mismo y un campo de 1 byte que indica el *tamaño neto de los datos*. Con esta información de tipo, versión, índice y tamaño, el interlocutor es capaz de interpretar los datos contenidos en el mensaje.

Objeto del diccionario					
Bytes:	1	1	1	1	variable
	Tipo	Versión	Índice	Número de bytes	Datos

Se reserva un área comprendida entre los valores 0x00 y 0x99 en la definición de los equipos a fin de que pueda ser empleada para definir los tipos genéricos comunes como parte del concepto

de estandarización que se busca. El resto del área se deja libre de manera que cualquier desarrollador pueda añadir sus propios tipos. Como tipos iniciales en esta etapa del desarrollo del protocolo se definen los siguientes en la Tabla 3.

Tabla 3: Posibles tipos de equipos.

TIPO	DESCRIPCION
0X01	Coordinador
0X02	Controlador de Módulo Fotovoltaico
0X03	Medido Módulo Fotovoltaico
0X04	Inversor Solar
0X05	Estación Meteorológica
0X06	Medidor de Strings de Módulos Fotovoltaicos
0X07 a 0x99	Reservado
0XAF a 0xFF	Disponible para aplicación propietaria

El campo *versión* permite que el desarrollador pueda realizar revisiones de su diccionario y facilita que diversas versiones de un mismo tipo puedan coexistir de forma conjunta sin necesidad de tener que modificar o actualizar todos los equipos.

El *índice* permite conocer que información contiene el objeto, podríamos comparar este índice con el número de página de un libro.

A fin de estandarizar la definición del diccionario de cualquier equipo se ha de respetar para cualquier nodo la distribución de información que se indica en la Tabla 4 para definir su propio diccionario, de manera que el área comprendida entre las direcciones 0x10 a 0xFE puede ser utilizada libremente por cada desarrollador del mismo modo que se deberá respetar la información que se define en el resto de direcciones.

Tabla 4: Distribución de la información en el diccionario.

INDICE	OBJETO
0x00	Baliza
0x01 – 0x02	Datos del fabricante
0x03 – 0x07	Datos de calibración y control
0x08 – 0x09	Datos de la instalación
0x0A	ID y Seguridad
0x0B – 0x0F	Reservado
0x10 – 0xFE	Área de comunicaciones libre
0xFF	Reservado

Es necesario indicar que el índice 0x00 corresponde a la baliza, es decir, la información que el equipo puede enviar como broadcast.

La principal ventaja de intercambiar información en base a un diccionario es el alto grado de estandarización que se alcanza, lo que ofrece a los desarrolladores rapidez, sencillez y fiabilidad en su implementación para cualquier aplicación.

4. Implementación en un microcontrolador

La pila de software para el micro está implementada en base al sistema de interrupción, y, puesto que se hace uso de los recursos hardware que ofrece el transceptor, se deja la mayor carga de trabajo del proceso a éste, de tal manera que cuando dispone de un mensaje válido avisa al microcontrolador mediante una entrada digital de interrupción y es en ese momento cuando, además de salir del modo de ahorro de energía si fuera necesario, accede a la información mediante SPI y almacena los bytes del paquete recibidos en una cola circular (buffer RX), sin más análisis del contenido de los datos, ya que posteriormente una tarea periódica

no bloqueante de baja prioridad que se ejecuta en el bucle principal del programa se encarga de procesar los mensajes, esto es, descryptarlos y realizar las acciones de acuerdo al tipo de trama recibida. La capacidad del buffer de recepción sólo está limitada por la cantidad de memoria del micro, siendo posible implementar espacio para un sólo paquete.

La solución basada en interrupción permite modos de funcionamiento de muy bajo consumo al poder hacer uso de las instrucciones de ahorro de energía del microcontrolador que, en conjunto con el bajo consumo del transceptor, hace posible sistemas con consumos inferiores a 3.05 mA en modo continuo de recepción.

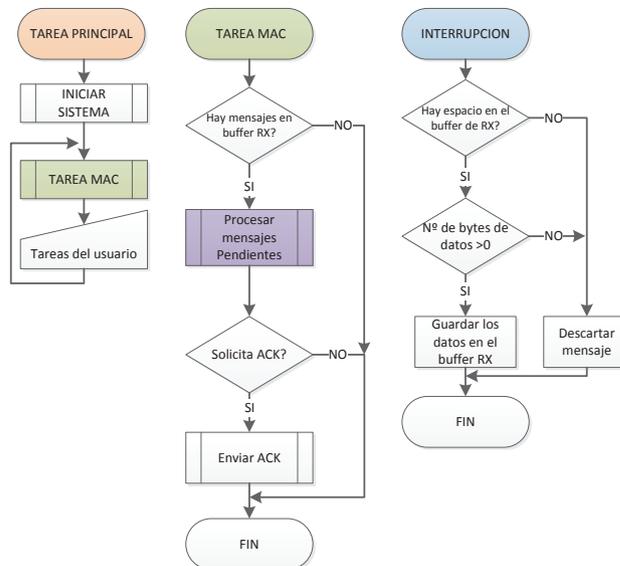


Figura 8: Diagrama de flujo de la implementación del protocolo DBWP en un microcontrolador.

La principal tarea del desarrollador en la implementación del protocolo consiste en la definición del diccionario y en la programación de las funciones que se deben ejecutar para cada objeto antes de enviarlo o tras ser recibidos, ya que la pila DBWP se encarga de la gestión completa de las comunicaciones.

Tabla 5: Parámetros de la estructura _DBWP_DIC, que define un objeto del diccionario en el código del micro controlador.

INDICE	OBJETO
Índice	Índice del objeto en el diccionario
Numbytes	Número de bytes de información
RWMode	Tipo de acceso permitido al objeto
CryptoOnly	Acceso sólo de manera encriptada al objeto
UnicastOnly	Acceso sólo mediante mensajes unicast
Datos	Puntero al área de datos del objeto
FuncionPrevioTX	Puntero a la función a ejecutar previo al envío del objeto a un interlocutor
FuncionPostRX	Puntero a la función a ejecutar tras la escritura de un interlocutor en el diccionario

Por tanto, el núcleo del protocolo será una matriz en la que se definen los diferentes objetos que componen el diccionario y las funciones que deben ejecutarse cuando se leen o escriben los objetos.

```

typedef struct {
    unsigned char Indice; //Índice del objeto descrito
    unsigned char NumByte; //tamaño en bytes del objeto
    unsigned char RWMode; //tipo de acceso 0-> RW, 1->R, 2->W
    unsigned char CryptoOnly; //acceso sólo encriptado
    unsigned char UnicastOnly; //acceso sólo mediante unicast
    unsigned char reserva; //reserva
    unsigned char *Datos; //puntero al área de datos
    void (* FuncionPreviaTX) (); //puntero a la función previa
    void (* FuncionPostRX) (); //puntero a la función posterior
} _DBWP_DIC;

_DBWP_DIC DIC [] = {
    {0x00, sizeof (_SALIZA), READONLY, 0, 0, 0, (BYTE*) &SALIZA, (void *) &PreSaliza, 0},
    {0x01, sizeof (_FabComm), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &FabComm, 0, 0},
    {0x02, sizeof (_CalibracionComm), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &CalibracionComm, 0, 0},
    {0x03, sizeof (_InstComm), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &InstComm, 0, 0},
    {0x08, sizeof (_CONFIG_DOMINIO), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &DBWP_CONFIG.Domini, 0, 0},
    {0x09, sizeof (_CONFIG_SEGURIDAD), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &DBWP_CONFIG.Seguridad, 0, 0},
    {0x0A, sizeof (_DataComm), 1, 0, 0, 0, (BYTE*) &DataComm, &PreDataComm, 0},
    {0x10, sizeof (_CONFIG_UBICACION), WRITEONLY, 0, 0, 0, (BYTE*) &CONFIG_UBICACION, 0, &PostCambiarUbicacion},
    {0x11, sizeof (_CONFIG_MRF), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &DBWP_CONFIG.MRF, 0, 0},
    {0x12, sizeof (_CONFIG_UBICACION), READONLY, 0, 0, 0, (BYTE*) &DBWP_CONFIG.Ubicacion, 0, 0},
    {0x13, sizeof (_CONFIG_MRF), RW, 0, 0, 0, (BYTE*) &DBWP_CONFIG.MRF, 0, 0},
    {0x64, sizeof (_CONFIGPERTEST), WRITEONLY, 0, 0, 0, (BYTE*) &CONFIGPERTEST, 0, &PostConfigPerTest},
    {0x65, sizeof (_PERTEST), READONLY, 0, 0, 0, (BYTE*) &PERTEST, 0, 0},
};
    
```

Figura 9: Definición de la estructura _DBWP_DIC que describe cada elemento del diccionario e implementación del diccionario en un micro controlador.

Cada uno de los mensajes que se recibe desde el transceptor se procesa de acuerdo al diagrama detallado en la figura 10.

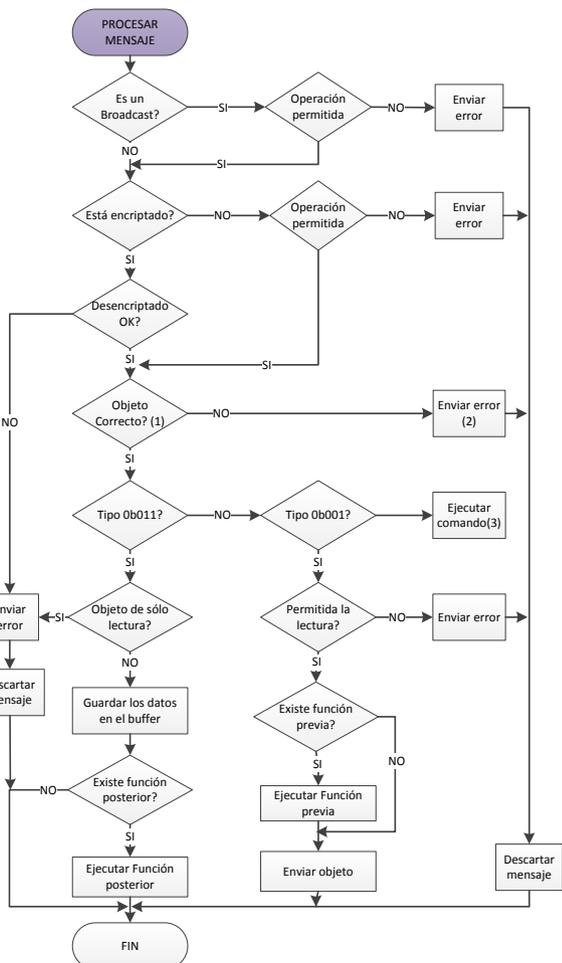


Figura 10: Diagrama de flujo del procesado de mensajes. (1) Debe existir el Índice y coincidir Tipo, Versión y Tamaño. (2) Se envía error detallando la primera discrepancia. Es posible configurar el protocolo para que no envíe errores. (3) Ejecuta el resto de comandos definidos por el Tipo de Trama y que no se han detallado en este diagrama.

5. Seguridad del protocolo

DBWP es un protocolo pensado para ejecutarse en pequeños microcontroladores con recursos limitados, por tanto, teniendo en cuenta la complejidad de ejecución de los diferentes algoritmos criptográfico frente al nivel de seguridad que aporta cada uno de ellos, se ha optado por usar como base para el cifrado el XTEA (Extended Tiny Encryption Algorithm), que permite un nivel de seguridad aceptable para este protocolo y no necesita gran espacio de memoria de programa o capacidad de cálculo.

El proceso de cifrado de los mensajes se implementa en base a CCM (Counter with CBC-MAC) que es un modo de criptografía basado en bloques que aporta autenticación y cifrado y que consta de dos etapas:

1. Firmado del mensaje completo usando una clave de 128 bits (CBC-MAC, cipher block chaining message authentication code).
2. Encriptado de parte del mensaje, incluida la firma usando XTEA como algoritmo de encriptación.



Figura 11: proceso de firmado y cifrado de un mensajes DBWP.

6. Rendimiento del protocolo

Para evaluar el rendimiento de un enlace DBWP se analizan latencia, tasa de envío de datos, RSSI y PER.

Factores como la capacidad de proceso del micro controlador o la ejecución del resto de código implementado en el mismo tienen una influencia decisiva en cuanto al rendimiento del sistema inalámbrico en términos de latencia y tasa de envío de paquetes del mismo modo que, tanto los elementos constructivos del propio equipo (antena, carcasa) como otros externos (edificios, árboles, condiciones climáticas) influyen en el alcance y tasa de paquetes perdidos. Por tanto, se ha desarrollado una herramienta que permite realizar una evaluación del enlace en las condiciones reales en las que opera.

Para integrar un PC en la red inalámbrica se dispone de una pasarela radio a USB basada en un micro controlador de 16 bits de Microchip® con puerto USB y de un módulo de radio MRF89XAM8A.

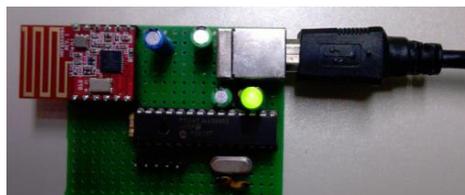


Figura 12: Pasarela Radio a USB.

5.1 Latencia punto a punto

La latencia punto a punto se define como la cantidad de tiempo entre que un paquete se empieza a generar en el emisor hasta que es recibido y analizado por el receptor, y es un parámetro importante en aquellos sistemas que requieren una alta tasa de datos. En las diversas pruebas realizadas al protocolo DBWP la latencia está por debajo de los 15 milisegundos con microcontroladores funcionando a 16 MIPS.

5.2 Indicador de fuerza de señal recibida (RSSI)

El RSSI es una escala de referencia para medir la potencia de la señal recibida por el receptor. Esta escala tiene el valor 0 dBm como centro que representa a 1 mW. Generalmente la escala se expresa en valores negativos, cuanto más negativos más pérdida de señal. El rango dinámico del MRF89XA es de 70 dBm con una resolución de 0.5 dBm.

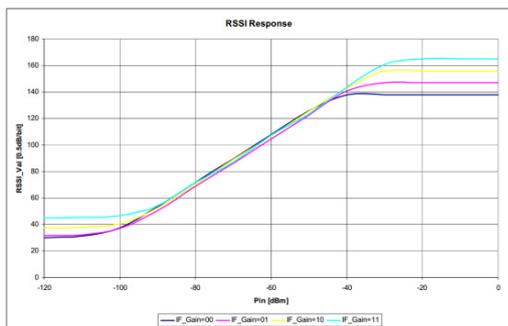


Figura 13: Rango dinámico del RSSI del MRF89XA.

El valor del RSSI en el receptor determinará si el paquete descartado o analizado.

5.2 Packet Error Rate (PER)

El PER es la relación entre el número de paquetes perdidos y el total enviado. Un valor de PER inferior a 1% sobre una muestra de 1000 paquetes con un tamaño de 30 bytes se usa normalmente como el límite para determinar el umbral de sensibilidad de la radio. El umbral de sensibilidad es el menor nivel de señal a la que el receptor puede decodificar la señal con un grado razonable de exactitud. En el caso del MRF89XA el umbral de RSSI en el receptor puede ser configurado a -103 dBm, -97 dBm, -91 dBm, -85 dBm, -79 dBm y -73 dBm.

5.3 Software de análisis y resultados obtenidos

El software desarrollado permite el análisis de un enlace DBWP con diferentes configuraciones del transceptor. Además se puede seleccionar el número de paquetes que se deben enviar para la prueba y el retardo entre ellos, de manera que con un retardo igual a cero, es posible analizar la mínima latencia y la máxima tasa de transferencia de bytes disponible.

La herramienta gráfica permite además analizar el impacto de factores externos, como la influencia en el RSSI de la actividad habitual en una oficina (movimiento de personas y objetos) o el paso de vehículos en enlaces en exterior.

La pila DBWP implementa en su diccionario los objetos para el uso de esta aplicación de análisis, en concreto los correspondientes a los índices 0x64 y 0x65 de la figura 9.

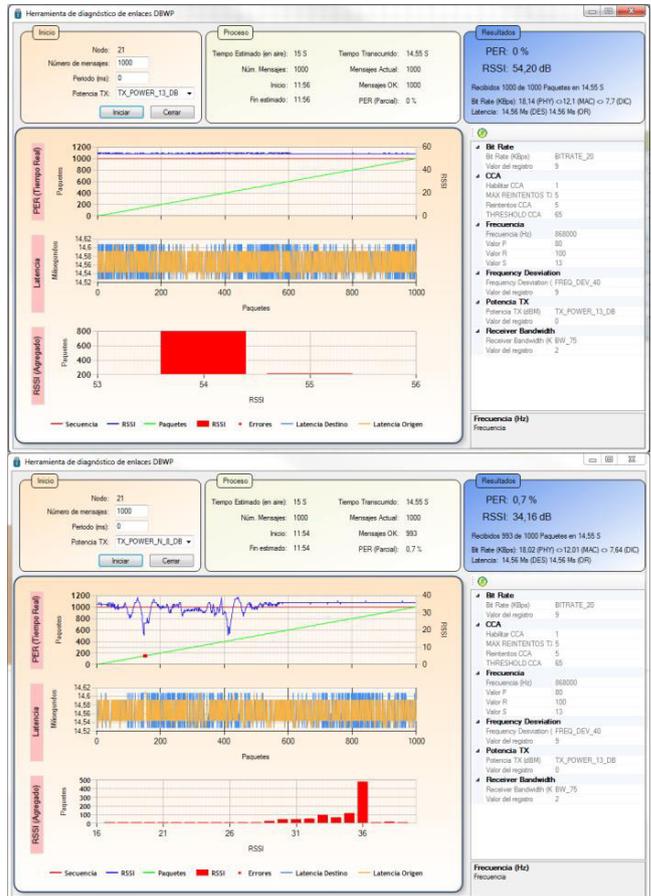


Figura 14: Software de análisis para DBWP. El informe gráfico muestra los paquetes perdidos de manera que es posible analizar la influencia del RSSI o latencia en ese instante. También se muestra la distribución del RSSI a lo largo de la prueba.

En la tabla 6 se exponen los resultados obtenidos para diversas condiciones. Tanto emisor como receptor disponen de microcontroladores de 16 bits y 16 MIPS (Million instructions per second), así como módulos MRF89XAM con antena integrada en el propio circuito impreso. Se envían 1000 paquetes a 20 KBps por prueba.

Tabla 6: resultado de las pruebas realizadas.

Descripción [Potencia][Retardo]	Distancia	PER	RSSI	Latencia
Interior oficina, una pared de ladrillo [-7dB],[0 ms]	15 m	0%	36	14.5 ms
Interior oficina, una pared de ladrillo [+1dB],[0 ms]	15 m	0%	44.4	14.5 ms
Interior oficina, una pared de ladrillo [+13dB],[0 ms]	15 m	0%	54	14.5 ms
Exterior, visión directa, altura 2 metros [+13dB],[50 ms]	25 m	0%	48	64.15 ms
Exterior, visión directa, altura 2 metros[+13dB],[50 ms]	50 m	0%	40.6	64.15 ms
Exterior, visión directa, altura 2 metros[+13dB],[50 ms]	100 m	0%	31.9	64.15 ms
Exterior, visión directa, altura 2 metros[+13dB],[50 ms]	150 m	1%	28	64.15 ms
Emisor en exterior, receptor en exterior, dos paredes de ladrillo [+13dB],[50 ms]	25 m	0%	36.1	64.15 ms

7. Aplicación del Protocolo en un Equipo de Control Fotovoltaico

A continuación se describe una aplicación práctica donde se implementa el protocolo anteriormente descrito para la gestión,

monitorización y control individual de optimizadores para módulos fotovoltaicos de capa fina en una instalación de I+D, de manera que, no sólo se puede acceder tanto en tiempo real como históricos a los datos de funcionamiento del módulo, sino que se pueden configurar los diferentes parámetros de funcionamiento del sistema y gestionar su conexión a la red o a los consumidores.

Para ello cada uno de los módulos a controlar se conecta a la carga a través de un dispositivo que realiza las medidas de voltaje, intensidad y temperatura del mismo y que dispone de la electrónica necesaria para realizar tareas de seguimiento del punto de máxima potencia y control del voltaje de salida al tiempo que dispone de un equipo de radio para conectar a un PC central, que a su vez accede a la red inalámbrica a través de una pasarela USB y que dispone de un software desarrollado ad-hoc para monitorizar, controlar y configurar los diversos dispositivos que forman parte del sistema.



Figura 15: Instalación fotovoltaica experimental con módulos de capa fina (a) y diagrama de bloques (b).

Cada uno de los dispositivos electrónicos de control está formado por los siguientes bloques funcionales:

- Alimentación del circuito desde el propio módulo.
- Medidas de voltaje, intensidad y temperatura
- Micro controlador
- Memoria FRAM para almacenamiento de datos
- Convertidores DC/DC
- Transceptor de radio

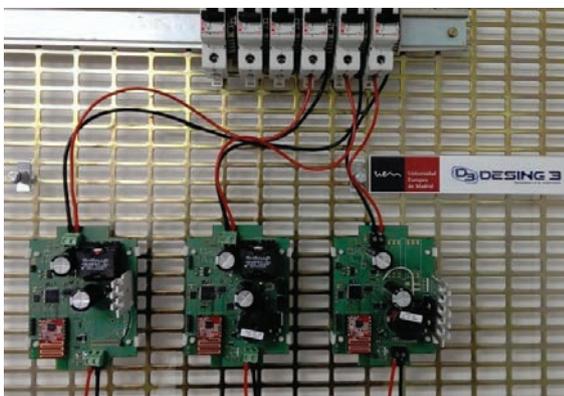


Figura 16: Instalación fotovoltaica experimental, controladores MPPT.

Gracias a la implementación del sistema de comunicación inalámbrica basado en el protocolo descrito, se facilitan de manera significativa las tareas de ajustes, optimización y calibración de los diversos dispositivos electrónicos que lo forman y se aportan las herramientas necesarias para su monitorización y gestión remota además del almacenamiento de

la información en una base de datos para su posterior análisis. En las próximas etapas del proyecto se incluirán en el sistema los datos de la estación meteorológica y de los inversores solares.

En la Figura 17 se detalla el diagrama de bloques de cada dispositivo, estando los parámetros de control y calibración de cada uno de los bloques disponibles en el diccionario que define al dispositivo y que se detalla en el Apéndice A.

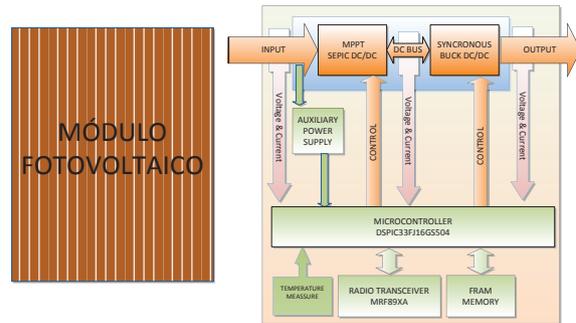


Figura 17: Diagrama de bloques del controlador fotovoltaico.

El software desarrollado (Figura 18) realiza una captura de datos periódica de cada uno de los equipos, con lo que es posible, por una parte la monitorización en tiempo real de cada uno de los controladores con una latencia de 200 milisegundos y por otra, realizar las tareas de ajustes, calibración y validación de los prototipos de manera remota, aportando un gran valor añadido al sistema.



Figura 18: Captura de diversas pantallas de la aplicación de gestión de la instalación, que permite visualizar en tiempo real los diferentes parámetros operativos y acceder a las opciones de calibración y configuración de cada uno de los equipos.

8. Conclusión

En este artículo se presenta un nuevo protocolo inalámbrico enfocado en la creación de picoredes y orientado a mensajes que permite el desarrollo de potentes sistemas de monitorización y control a la vez que minimiza los recursos hardware y software necesarios para su implementación y que posibilita el desarrollo de sistemas de muy bajo consumo, características necesarias en las aplicaciones MLPE, tanto para optimizadores dc/dc como para micro-inversores, pero que también puede ser aplicado en sistemas de monitorización donde las características descritas pueden aportar un valor añadido como es el caso del resto de

sistemas de energías renovables o las aplicaciones de monitorización remota de ultra bajo consumo.

Se aporta por tanto una alternativa libre, eficiente y robusta a otros protocolos basados en el IEEE 802.15.4 que da cobertura a una emergente línea de trabajo en el sector fotovoltaico como es la electrónica empotrada a nivel de módulo (MLPE).

Tabla 7: Comparativa de protocolos basados en IEEE 802.15.4.

	Zigbee	Miwi	DBWP
Tamaño código	30-80KB	13-35KB	~8KB ¹
Orientado a	Conexión	Conexión	Mensaje
Máx. nodos	64000	1024	254
Filtro en PHY ¹	No	No	Si
Robustez ²	Baja	Baja	Alta
Consumo ³	Alto	Alto	Bajo
Royalties/Canon	Si	Si	No

¹ Parte de las tareas de filtrado de paquetes se realiza en el propio receptor sin llegar al microcontrolador.

² La información no se fragmenta.

³ Debido principalmente a las técnicas de enrutado que requieren más capacidad de cálculo y no permite el uso de filtrado en el transceiver.

⁴ Tamaño completo de la aplicación de prueba usada. Para Zigbee y Miwi los tamaños indicados corresponden a las especificaciones de las librerías disponibles en www.microchip.es.

En un futuro trabajo se realizará un nuevo avance hacia la estandarización del protocolo, definiendo de manera precisa los objetos comunes del diccionario y los mecanismos de acceso a los mismos, además se implementarán servicios comunes como la sincronización horaria o los procedimientos del uso de la baliza.

English Summary

Wireless Protocol for Renewable Installations.

Abstract

During the last four years, photovoltaic (PV) has faced its first consolidation phase, due among other factors to the economic crisis. Under these circumstances, the PV industry had the vital need to reduce costs. A new technology, called module level power electronics (MLPE), is since then rapidly expanding and carries the promises to increase not only the efficiency but also the flexibility and safety of PV systems. However, an optimal MLPE solution shall depend on the effectiveness of its data communication management. Unfortunately, today, there is no standard protocol available that encompasses the desired features as listed below. This article proposes a protocol for wireless communications: open, robust, secure, light to implement on a small micro-controller, achieving ultra-low power consumptions and, thanks to being message oriented, avoids information fragmentation and allows for low bandwidth needs even in high noise level environments. Above all, this protocol provides a solution to standardize communication between all components of a PV system (regardless of type and size). Finally, this protocol can be extended to wind and hydro-micro-generation systems and to the remote monitoring of any other application in which DBWP could be interesting.

Keywords:

Renewable, photovoltaic, wireless communication, protocol.

Referencias

- An-Kyu Lee, G.-W. S.-T.-K. (2014). A study on development of ICT convergence technology for tracking-type floating photovoltaic systems. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 80-87.
- Baker, N. (2005). ZigBee and Bluetooth: Strengths and weaknesses for industrial applications. *IEE Computing & Control Engineering*, 16(2), 20-25.
- Bluetooth. (2014). Obtenido de <https://www.bluetooth.org>
- Clinic Solar System. (2014). Obtenido de <http://www.mype.com/P-Clinic-Solar.html>
- ETSI. (2012). *ETSI EN 300 220-1 V2.4.1 (2012-01)*.
- Greentechsolar. (2013). Obtenido de <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Solar-Summit-Slide-Show-The-PV-Module-Market>
- GTM Research. (2014). Obtenido de <http://www.greentechmedia.com/research/report/themicroinverter-and-dc-optimizer-landscape-2014>
- IEEE 802.11: Wireless LANs. (2014). Obtenido de <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.11.html>
- IEEE 802.15. (2014). Obtenido de <http://standards.ieee.org/about/get/802/802.15.html>
- ITRPV 2014 Rev. 1. (2014). Obtenido de <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>
- Jin-Shyan Lee, Y.-W. S.-C. (2007). The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). *A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*, (págs. 46-51). Taipei.
- Katara, V. N. (2012). Comparative Analysis and interpretation of various short-range wireless technologies. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 1-5.
- Luis Javier García Villalba, A. L. (2009). Routing Protocols in Wireless Sensor Networks. *sensors*, 8399-8421.
- Martín E. Andreoni López, F. J. (2012). Implementation of Wireless Remote Monitoring and Control of Solar Photovoltaic (PV) System. *IEEE Microchip*. (2016). Obtenido de <http://www.microchip.com>.
- Microchip MiWi™ Stack. (2010). Obtenido de <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN1066%20-%20MiWi%20App%20Note.pdf>
- Neha Rathi, J. S. (2012). A Review on routing protocols for application in wireless sensor networks. *International Journal of Distributed and Parallel Systems (IJDPS)*, 39-58.
- NRGBUZZ. (2013). Obtenido de <http://nrgbuzz.com/2013/12/01/rest-in-peace-the-list-of-deceased-solar-companies-2009-to-2013/>
- Pickarel, K. (2013). *solarbuildermag.com*. Obtenido de <http://solarbuildermag.com/featured/solaredge-module-level-power-electronics/>
- Potorti, E. F. (2005). Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: A. *IEEE Wireless Commun.*, 12(1), 12-16.
- Real Decreto-ley 14/2010. (23 de 12 de 2010). Obtenido de <http://www.boe.es/boe/dias/2010/12/24/pdfs/BOE-A-2010-19757.pdf>
- rfisolar. (2016). Obtenido de <http://rfisolar.com.au/browse-products/monitoring-systems/sma-bluetooth-wireless-technology.html>
- Vishwakarma, D. (2012). IEEE 802.15.4 and ZigBee: A Conceptual Study. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 477-480.
- Wang Huan, X. X. (2013). Wireless Sensor Network in the Photovoltaic Power Generation Monitoring System. *TELKOMNIKA*, 4774-4779.
- zigbee. (2016). Obtenido de <http://www.zigbee.org>

Apéndice A. Detalle del diccionario del equipo experimental.

A continuación se detalla el diccionario correspondiente al equipo 0xAA (Controlador para Módulo fotovoltaico) versión 0x01 (Revisión inicial).

INDICE	CAMPO	BYTES	DESCRIPCION
0x00 Baliza			
0x00	Etapa	1	Etapa del controlador
0x00	Error	1	Número de error del sistema, 0= OK
0x00	Voltaje Entrada	2	valor en centésimas de voltios
0x00	Corriente Entrada	2	valor en miliamperios
0x00	Voltaje Bus	2	valor en voltios * 100
0x00	Voltaje Salida	2	valor en centésimas de voltios
0x00	Corriente Salida	2	valor en miliamperios
0x00	Duty Sepic	2	Duty cycle DC/DC sepic
0x00	Duty Buck	2	Duty cycle DC/DC buck
0x00	Temperatura	2	Temperatura interna en decimas de grado
0x00	Modo Operación	2	ModoOperacionStop (0) ModoOperacionRun (1) ModoOperacionStby (2)
0x01 Fabricante			
0x01	Fabricante	10	Nombre del fabricante
0x01	Serial	10	Número de serie
0x01	Modelo	8	Modelo
0x01	FechaFab	8	Fecha de fabricación DDMMAAAA
0x03 Calibración			
0x03	CalVIN	2	Valor de calibración del voltaje de entrada
0x03	CalCIN	2	Valor de calibración de la intensidad de entrada
0x03	CalVBUS	2	Valor de calibración del voltaje del Bus
0x03	CalVOUT	2	Valor de calibración del voltaje de salida
0x03	CalCOUT	2	Valor de calibración de la intensidad de salida
0x04 Control			
0x04	MinVEntrada	4	Voltaje mínimo en la entrada (float)
0x04	MaxVEntrada	4	Voltaje máximo en la entrada (float)
0x04	MinVSalida	4	Voltaje mínimo en la salida (float)
0x04	MaxVSalida	4	Voltaje máximo en la salida (float)
0x04	MinVBus	4	Voltaje mínimo en el bus (float)
0x04	MaxVBus	4	Voltaje máximo en el bus (float)
0x04	SpVsalida	4	Set point voltaje de salida (float)
0x04	BuckKP	4	Componente proporcional del PID (float)
0x04	BuckKI	4	Componente integral del PID (float)
0x04	BuckKD	4	Componente diferencial del PID (float)

0x08 Datos del integrador			
0x08	Integrador	10	Nombre del integrador
0x08	RefInstalacion	10	Referencia de la instalación
0x08	Ubicacion	10	Ubicación del módulo en la instalación
0x08	FechaInst	8	DDMMAAAA
0x09 Datos del módulo fotovoltaico conectado al equipo			
0x09	Fabricante	10	Nombre del fabricante del módulo
0x09	Serial	10	Número de serie del módulo
0x09	Modelo	8	Modelo
0x09	FechaFab	2	DDMMAAAA
0x09	VMppStab	2	Voltaje Mpp estabilizado en décimas de voltio
0x09	IMpp	2	Intensidad Mpp en miliamperios
0x09	RSerie	2	Resistencia serie en mili ohmios
0x09	RParalelo	2	Resistencia paralela en mili ohmios
0x09	FF	2	Field factor (valor * 10)
0x10 Datos en valor de ingeniería			
0x10	Etapa	1	Etapa del controlador
0x10	Error	1	Número de error del sistema, 0= OK
0x10	Voltaje Entrada	2	valor en centésimas de voltios
0x10	Corriente Entrada	2	valor en miliamperios
0x10	Voltaje Bus	2	valor en centésimas de voltios
0x10	Voltaje Salida	2	valor en centésimas de voltios
0x10	Corriente Salida	2	valor en miliamperios
0x10	Duty Sepic	2	Duty cycle DC/DC sepic
0x10	Duty Buck	2	Duty cycle DC/DC buck
0x10	Temperatura	2	Temperatura interna en decimas de grado
0x10	Modo Operación	2	ModoOperacionStop (0) ModoOperacionRun (1) ModoOperacionStby (2)
0x11 Datos en valor RAW (salida convertidor ADC Q15)			
0x11	Etapa	1	Etapa del controlador
0x11	Error	1	Número de error del sistema, 0= OK
0x11	Voltaje Entrada	2	Q15
0x11	Corriente Entrada	2	Q15
0x11	Voltaje Bus	2	Q15
0x11	Voltaje Salida	2	Q15
0x11	Corriente Salida	2	Q15
0x11	Duty Sepic	2	Duty cycle DC/DC sepic
0x11	Duty Buck	2	Duty cycle DC/DC buck
0x11	Temperatura	2	Q15
0x11	Modo Operación	2	ModoOperacionStop (0) ModoOperacionRun (1) ModoOperacionStby (2)
0x12 Eventos			
0x12	Evento	1	Código del último evento
0x12	Evento -1	1	Código del evento
0x12	Evento -2	1	Código del evento
0x12	Evento -3	1	Código del evento
0x12	Evento -4	1	Código del evento
0x12	Evento -5	1	Código del evento