

# Lector de Bajo Coste de Sensores Electromagnéticos, Pasivos e Inalámbricos para el Internet de las Cosas (IoT)

Gabriel Galindo Romera <sup>(1)</sup>, Javier Carnerero Cano <sup>(1)</sup>, José Juan Martínez Martínez <sup>(1)</sup>, Francisco Javier Herraiz Martínez <sup>(1)</sup>

ggalindo@tsc.uc3m.es, jccano@tsc.uc3m.es, jmartinez@tsc.uc3m.es, fjherraiz@tsc.uc3m.es

<sup>(1)</sup> Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid. Avenida de la Universidad, 30, 28911, Leganés, Madrid.

**Abstract-** In this work, a novel low-cost and portable Internet-of-Things (IoT) reader for the measurement of passive electromagnetic wireless sensors is proposed. This reader is used to interrogate the sensor within a short-range wireless link which is useful for the remote monitoring of harmful substances. This remote monitoring is possible thanks to the inclusion of the IoT functionalities. The proposed IoT reader is based on four layers (the radiating layer, the RF interface, the IoT mini-computer and the power unit) which are described in this communication. In order to show the validity of the system a demonstrator including all the layers is manufactured. Furthermore, the demonstrator is tested with different liquids and it has been demonstrated that a linear approximation can be extracted from the reader measurements.

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han publicado varios trabajos de sensores electromagnéticos [1]-[3]. Una importante ventaja de este tipo de sensores es que pueden ser fácilmente integrados con antenas obteniendo, por lo tanto, dispositivos inalámbricos [4]. Una de las actuales tendencias en sensores electromagnéticos está basada en sistemas de identificación por radiofrecuencia (RFID). Un sistema RFID consta de dos elementos: el lector y las etiquetas [5]. Cada etiqueta contiene un único código de identificación. El lector interroga a las etiquetas que estén dentro del rango de lectura, mientras que las etiquetas contestan al lector con sus códigos de identificación. Para poder seguir este protocolo de operación la mayoría de estas etiquetas están formadas por una antena y por un chip RFID. Durante la última década se han propuesto varios sensores inalámbricos basados en chips de RFID [6]-[7]. El principal problema es que la inclusión de chips de RFID incrementa el precio de las etiquetas y de los sensores limitando las posibilidades de éxito del sistema. Por este motivo, se propone el uso de una tecnología pasiva y sin chips [8]-[9]. Este tipo de tecnología resulta en una alternativa de bajo coste para el sensado mediante componentes pasivos y la mejor solución para sensores desechables.

Gran parte bibliografía solamente se centra en la parte sensora, mientras que ignora la lectura del sensor. Esta filosofía conlleva al empleo de equipos de laboratorio de muy alto coste y de alta complejidad, los cuales solo pueden ser utilizados por personal experimentado y, así, obtener la respuesta de los sensores. Por este motivo, el desarrollo de sistemas de lectura de bajo coste para sensores

electromagnéticos resulta crucial para el éxito de esta tecnología así como para el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*). El IoT se define como la interconexión de distintos objetos físicos a redes de comunicaciones, las cuales permiten el intercambio de información. Según la Comisión Europea, esta infraestructura global representa el siguiente paso en la digitalización de la sociedad y la economía [10].

En este trabajo se propone un nuevo lector IoT (L-IoT) de bajo coste para sensores electromagnéticos, pasivos e inalámbricos. El sistema propuesto se puede utilizar para interrogar a estos sensores dentro de un enlace inalámbrico de corto alcance. Esto resulta útil, por ejemplo, para el monitoreo remoto de sustancias peligrosas. La implementación del L-IoT resulta en una solución portable, fácil de manejar y de bajo coste. Además, la inclusión de las funcionalidades IoT al lector permiten el sensado remoto desde ordenadores o dispositivos portátiles. Por otro lado, con la tecnología propuesta también es posible realizar otras operaciones tales como el almacenamiento automático en la nube o la computación en la nube (por ejemplo, post-procesado en la nube de los datos enviados por el lector). La adquisición remota de datos por parte del L-IoT puede ser totalmente automatizada y eficiente, reduciendo los posibles errores humanos en la adquisición, el procesado y el almacenamiento de los datos sensados. En este artículo se presenta un demostrador totalmente funcional de la tecnología propuesta. Para mostrar la viabilidad del sistema se utiliza conjuntamente con un sensor sumergible para medir la permitividad relativa de diferentes líquidos. El demostrador puede ser utilizado para sensar otras magnitudes físicas cambiando el tipo de sensor.

La organización de esta comunicación es la siguiente: en la Sección II se muestra el sistema de lectura propuesto; las medidas se muestran en la Sección III; finalmente, el trabajo se concluye en la Sección IV.

## II. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El esquema general del sistema de sensado se muestra en la Fig. 1. Está principalmente compuesto por dos elementos: un sensor electromagnético, pasivo e inalámbrico y un L-IoT. El sensor es capaz de re-radiar una señal electromagnética inalámbrica la cual dependerá de la magnitud bajo medida. En este trabajo, el sistema se utilizará para obtener la

permitividad relativa de diferentes líquidos sumergiendo el sensor en cada uno de los líquidos bajo medida (LBM). El sensor utilizado está basado en partículas metamateriales impresas sin electrónica adicional, lo cual lo convierte en una solución de bajo coste, reemplazable, sin baterías y pasiva. La inclusión de antenas en el sensor permite que esta tecnología también sea inalámbrica.

Con el objetivo de implementar la aplicación propuesta se utilizará el sensor sumergible propuesto en [11] por los autores. El sensor está basado en un par de *split-ring resonators* (SRRs) acoplados a una línea microstrip. Los SRRs introducen un cero en el coeficiente de transmisión ( $S_{21}$ ) entre los puertos de la línea microstrip. El principio de sensado se basa en el desplazamiento frecuencial del cero de transmisión cuando los SRRs se sumergen en los diferentes LBMs. En [11] se demostró que el cero de transmisión varía entre 1.6 y 1.9 GHz, correspondiendo a permitividades relativas entre 1 y 9. Todas las medidas fueron tomadas conectando el sensor con cables coaxiales a un analizador de redes vectorial. En este trabajo se han medido permitividades relativas entre 1 y 6 debido a la imposibilidad de encontrar líquidos no polares fuera de este rango. Con el objetivo de obtener un sistema inalámbrico los puertos del sensor se conectan a dos antenas tipo parche. El sistema también contiene un L-IoT, el cual genera la señal de radiofrecuencia (RF) necesaria para interrogar al sensor inalámbrico, recibe la respuesta del sensor, digitaliza esta señal y actúa como la interfaz IoT del laboratorio.

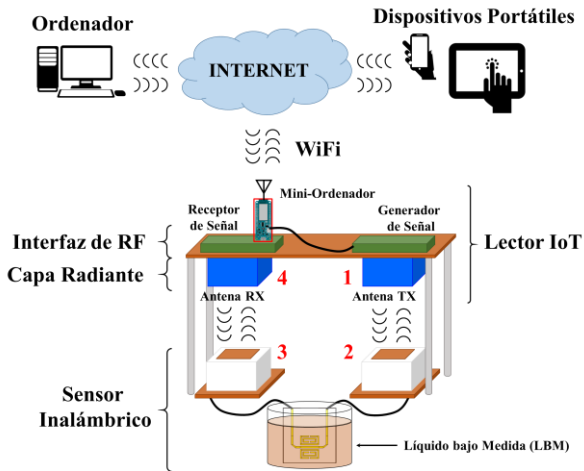


Fig. 1. Esquemático del sistema de sensado IoT propuesto.

El L-IoT sigue el esquema de capas de la Fig. 2. Está basado en cuatro capas: la capa radiante, la interfaz de RF, el mini-ordenador IoT y la unidad de potencia. La unidad de potencia se utiliza para generar las señales de alimentación necesarias por la interfaz de RF. Las otras capas se explican con más detalle en las siguientes subsecciones.

#### A. Capa radiante

La capa radiante está inspirada en un sistema biestático. El esquemático de esta capa se puede ver en la Fig. 1. En el esquema propuesto se utilizan cuatro antenas de banda ancha de tipo parche: dos antenas para el lector (transmisión y recepción) apuntadas a dos antenas conectadas a los puertos del sensor. El enlace inalámbrico se establece entre las cuatro antenas. El principio de operación es el siguiente: se conecta a la antena 1 (Antena TX) un generador de señal, el cual realiza un barrido frecuencial entre 1.6 y 1.9 GHz; esta señal se

transmite de la antena 1 a la 2, conectada al puerto de entrada del sensor; la señal pasa a través del sensor, sumergido en el LBM, al puerto de salida donde la antena 3 está conectada; el sensor modificará la señal en función del líquido en el cual esté sumergido; la antena 3 envía la señal, modificada por el sensor, a la antena 4 (Antena RX); finalmente, la señal es detectada por el receptor de señal.

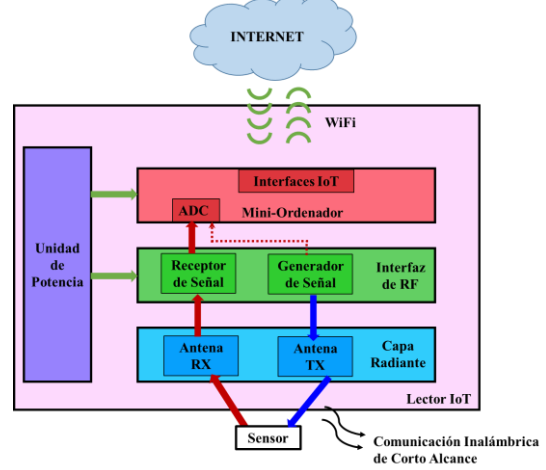


Fig. 2. Diagrama de Capas del Lector IoT.

#### B. Interfaz de RF

En la Fig. 2 se puede observar que la interfaz de RF está dividida en dos bloques: el generador de señal y el receptor de señal.

El esquema general del generador de señal se muestra en la Fig. 3. Está compuesto por un oscilador controlado por tensión (VCO) donde su frecuencia de oscilación está controlada por una tensión de entrada ( $V_{TUNE}$ ). La tensión de entrada determina la frecuencia de oscilación instantánea del VCO. La tensión de entrada del VCO está generada por un generador de funciones basado en un circuito integrado monolítico. Este generador de funciones produce una señal triangular periódica de baja frecuencia ( $V_{TUNE}$ ) la cual servirá para barrer el rango de frecuencias deseado (1.6-1.9 GHz). En concreto, se generará un barrido creciente y otro decreciente en cada periodo. El nivel de potencia de salida del VCO es de 12 dBm aproximadamente.

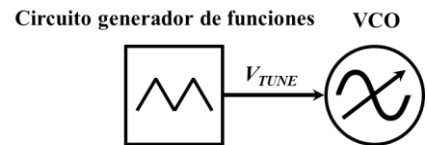


Fig. 3. Esquema general del generador de señal.

El esquema general del receptor de señal se muestra en la Fig. 4. Este receptor está compuesto por un amplificador balanceado de banda ancha y un detector basado en un diodo Schottky (SDD, del inglés *Schottky Diode Detector*). El amplificador de RF compensa las pérdidas en espacio libre entre las antenas que componen el enlace inalámbrico. La ganancia del amplificador es de 10.2 dB. El amplificador es necesario ya que a la entrada del detector debe llegar una señal detectable con un nivel de potencia superior a -15 dBm. El SDD produce una tensión de salida ( $V_{DET}$ ) proporcional a la potencia de la señal recibida del sensor. En la Fig. 5 se muestra la interfaz de RF fabricada. Se pueden observar los dos bloques que la componen y las dimensiones de la placa.

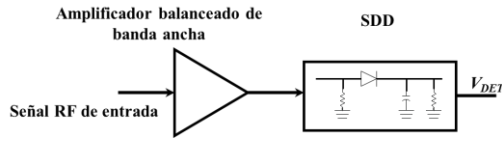


Fig. 4. Esquema general del receptor de señal.

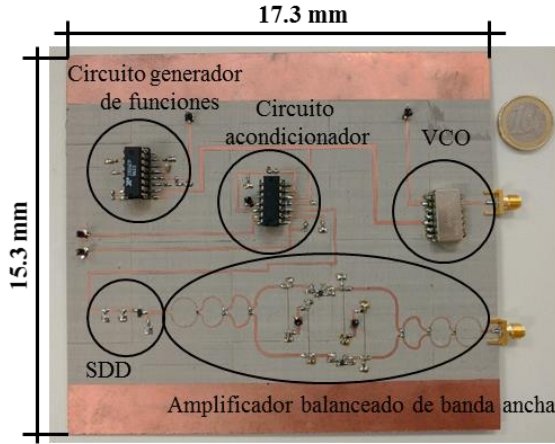


Fig. 5. Interfaz RF fabricada.

### C. Mini-ordenador IoT

El mini-ordenador IoT utilizado es un Arduino (modelo MKR1000). Este mini-ordenador primero digitaliza las señales, mediante los conversores analógico-digital (ADC, del inglés *Analog to Digital Converter*) que tiene incorporados, y después las envía a través de Internet gracias a las funcionalidades IoT incorporadas. Los niveles de voltaje de estas señales deben ser acondicionados a valores adecuados antes de su digitalización. Para ello se utiliza un circuito acondicionador basado en amplificadores operacionales (modelo LM324N).

Se ha desarrollado un protocolo específico basado en comandos. Este protocolo es montado sobre TCP/IP en la capa de aplicación. Por otro lado, con este esquema el lector tiene asociada una dirección IP. Además, el lector está escuchando peticiones asociadas a este protocolo en el puerto 23 de TCP. La adquisición de datos a través de Internet, entre un servidor y un cliente, es posible gracias a este protocolo. En este protocolo, el servidor es el L-IoT y el cliente es un dispositivo remoto solicitando los datos sensados.

## III. MEDIDAS

Después de comprobar el correcto funcionamiento de cada una de las capas por separado, se integró el sistema completo. El montaje experimental se muestra en la Fig. 6. Con el objetivo de demostrar la validez del sistema completo el sensor se sumergió en diferentes LBM. La TABLA 1 incluye las muestras medidas, así como sus permitividades relativas correspondientes. Se puede observar que las permitividades relativas de las muestras seleccionadas varían entre 1 y 6. Los resultados medidos se obtienen remotamente a través de Internet ejecutando un cliente en un ordenador portátil. Este cliente ha sido programado en Matlab.

En la Fig. 7 se muestran las medidas del sistema completo para cada uno de los líquidos. La señal triangular ( $V_{TUNE}$ ) es la encargada de realizar el barrido frecuencial del VCO. Para este caso particular se puede observar un solo período de esta señal triangular en el cual se realizarán dos barridos: el primero irá de 1.6 a 1.9 GHz (barrido creciente)

mientras que el segundo irá de 1.9 a 1.6 GHz (barrido decreciente). En cada uno de los barridos aparece un mínimo de voltaje para un tiempo distinto en cada medida:  $t_1$  en el barrido creciente y  $t_2$  en el barrido decreciente. Estos mínimos están relacionados con la frecuencia de resonancia del sensor para diferentes LBMs, tal y como se explicó en la sección anterior. El sensado mediante el sistema completo se basa en la diferencia de tiempo entre  $t_2$  y  $t_1$  ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ). En la TABLA 1 se incluye la diferencia de tiempo,  $\Delta t$ , asociada a cada muestra. Se puede apreciar una diferencia de tiempo de entre 3.59 ms y 8.04 ms para valores de permitividad relativa de entre 1 y 5.77, correspondientes a espacio libre y  $\text{CHCl}_3$  respectivamente. Cada una de las muestras medidas presenta un  $\Delta t$  distinto.

La Fig. 8 muestra la dependencia de la permitividad relativa con la diferencia de tiempo ( $\Delta t$ ) para cada muestra. Los resultados medidos se pueden aproximar mediante una relación lineal entre la diferencia de tiempo y la permitividad relativa para cada muestra. La diferencia de tiempo se puede aproximar en función de la permitividad relativa mediante:

$$\Delta t[\text{ms}] = 0.93 \cdot \varepsilon_r + 2.66 \quad (1)$$

La aproximación puede ser utilizada para estimar la permitividad relativa de la muestra,  $\varepsilon_r$ , después de haber medido la diferencia de tiempo entre dos mínimos en la señal detectada. Por lo tanto,  $\varepsilon_r$  puede ser fácilmente estimada a partir de:

$$\varepsilon_r = 1.07 \cdot \Delta t[\text{ms}] - 2.86 \quad (2)$$

El error medio resultante entre las medidas y la curva estimada es del 1.71%.



Fig. 6. Demostrador incluyendo todos los elementos del sistema.

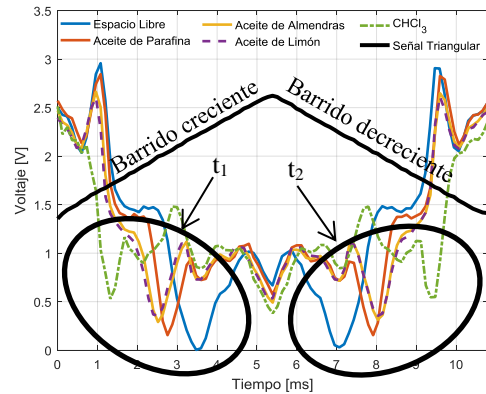


Fig. 7. Medidas del sistema completo.

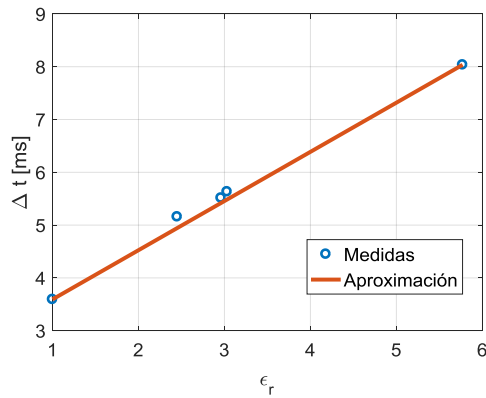


Fig. 8. Diferencia de tiempo ( $\Delta t$ ) de los líquidos medidos (puntos azules) y de la aproximación lineal (línea roja).

TABLA 1  
RESULTADOS OBTENIDOS CON EL SISTEMA COMPLETO

Material	Permitividad Relativa ( $\epsilon_r$ )	$t_1$ [ms]	$t_2$ [ms]	$\Delta t$ ( $t_2 - t_1$ )
Espacio libre	1	3.48	7.07	3.59
Aceite de parafina	2.46	2.76	7.91	5.16
Aceite de almendras	2.96	2.52	8.03	5.51
Aceite de limón	3.03	2.40	8.03	5.63
$\text{CHCl}_3$	5.77	1.32	9.36	8.04

#### IV. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un novedoso L-IoT de bajo coste para sensores electromagnéticos, pasivos e inalámbricos. El sistema está basado en un diagrama de capas formado por: la capa radiante, la interfaz de RF, el mini-ordenador IoT y la unidad de potencia. El trabajo se centra en la implementación de un demostrador del sistema de sensado completo. Por este motivo, se ha realizado el diseño de cada una de las capas. Todas las capas han sido previamente caracterizadas por separado antes de formar el sistema L-IoT completo.

Se ha demostrado el correcto funcionamiento del L-IoT mediante la medida de distintos líquidos con diferentes propiedades. Los resultados pueden ser fácilmente aproximados mediante una regresión lineal, la cual presenta un error bajo con respecto a las medidas. Una de las aplicaciones más interesantes es la posibilidad de realizar medidas remotas de sustancias peligrosas evitando el contacto directo con ellas.

El sensor que los autores presentaron en [11] representaba una solución cableada, mientras que el L-IoT propuesto en esta comunicación es capaz de detectar la señal re-radiada del sensor presentando una solución completamente inalámbrica. En [12] se puede ver una explicación más detallada de los circuitos que componen cada una de las capas.

Una vez fabricado, el L-IoT ha sido interrogado remotamente a través de Internet por un cliente ejecutado en un ordenador portátil. El protocolo utilizado es montado sobre TCP/IP en la capa de aplicación. El L-IoT tiene una dirección IP asociada mientras está escuchando las peticiones en el puerto 23 de TCP.

El esquema propuesto representa una importante novedad ya que, hasta donde los autores conocen, es el primer lector

para sensores electromagnéticos, pasivos e inalámbricos incluyendo funcionalidades de IoT. Además se trata de una solución de bajo coste y portable. Cabe destacar que el L-IoT puede ser utilizado con distintos tipos de sensores electromagnéticos e inalámbricos, que transducen variaciones en el dominio de la frecuencia. Los autores están trabajando en la integración completa de sensores con antenas.

#### REFERENCIAS

- [1] A. P. Gregory and R. N. Clarke, "A review of RF and microwave techniques for dielectric measurements on polar liquids," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 4, pp. 727-743, 2006.
- [2] M. Schueler, C. Mandel, M. Puentes and R. Jakoby, "Metamaterial inspired microwave sensors," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 57-68, 2012.
- [3] T. Chen, S. Li and H. Sun, "Metamaterials application in sensing," *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2742-2765, 2012.
- [4] H. Huang, "Flexible wireless antenna sensor: A review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 19, pp. 3865-3872, 2013.
- [5] K. Finkenzeller, "RFID Handbook: Fundamentals and Application in Contactless Smart Cards and Identification," *John Wiley & Sons*, New York, NY, USA, 2003.
- [6] R. Vyas, V. Lakafosis, H. Lee, G. Shaker, L. Yang, G. Orecchini, A. Traille, M. Tentzeris and L. Roselli, "Inkjet printed, self powered, wireless sensors for environmental, gas, and authentication-based sensing," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 12, pp. 3139-3152, 2011.
- [7] J. Zhang, G. Y. Tian, A. M. Marindra, A. I. Sunny and A. B. Zhao, "A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications," *Sensors*, vol. 17, no. 2, pp. 265, 2017.
- [8] S. Preradovic and N. C. Karmakar, "Chipless RFID: Bar Code of the Future," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 11, no. 7, pp. 87-97, 2010.
- [9] E. M. Amin and N. C. Karmakar, "Development of a chipless RFID temperature sensor using cascaded spiral resonators," *2011 IEEE Sensors*, pp. 554-557, 2011.
- [10] ITU-T Y.4000/Y.2060 (06/2012) Overview of the Internet of Things. Disponible online: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11559&lang=en> (accedido el 12 de Mayo de 2017).
- [11] G. Galindo-Romera, F. J. Herraiz-Martínez, M. Gil, J. J. Martínez-Martínez and D. Segovia-Vargas, "Submersible Printed Split-Ring Resonator-Based Sensor for Thin-Film Detection and Permittivity Characterization," *IEEE Sensors Journal*, vol. 14169, pp. 1, 2016.
- [12] G. Galindo-Romera, J. Camerero-Cano, J. J. Martínez-Martínez and F. J. Herraiz-Martínez, "An IoT Reader for Wireless Passive Electromagnetic Sensors," *Sensors*, vol. 17, no. 4, pp. 693, 2017.