

# Práctica de Laboratorio de Captura de Energía de Radio Frecuencia

L. Boquete, R. Barea, J. M. Rodríguez-Ascariz, J. J. Cantos, J. M. Miguel

Departamento de Electrónica  
Universidad de Alcalá  
Alcalá de Henares, España  
{boquete, barea, jmra}@depeca.uah.es

**Resumen**— La obtención de energía por medios alternativos, amigables con el medio ambiente, y que no dependan de baterías contaminantes a las que haya que recargar y asegurar un mantenimiento periódico, se plantea como una opción interesante en la alimentación de sistemas electrónicos autónomos de bajo consumo. En este trabajo se presenta una práctica de laboratorio que permite obtener energía eléctrica a partir de una señal de radio frecuencia (RF). El alumno aprende a diseñar y a caracterizar una antena de parche básica, comprende el proceso de sintonización de señales de RF y comprueba el funcionamiento del sistema. También se plantean posibles ampliaciones y modificaciones que ayudan al alumno a enriquecer su conocimiento sobre potenciales aplicaciones de los sistemas de captura de energía de RF. Se incluye finalmente la opinión de los alumnos que han realizado esta práctica en el laboratorio durante tres cursos académicos.

**Keywords:** *Energía de RF, Comunicaciones Inalámbricas, Rectenna.*

## I. INTRODUCCIÓN

El concepto de Energy Harvesting consiste en un conjunto de técnicas que permiten obtener energía eléctrica a partir de medios no convencionales como puede ser el sol, viento, movimiento, etc. El objetivo es obtener energía eléctrica suficiente para alimentar sistemas autónomos. Como ejemplo de aplicaciones se pueden indicar dispositivos portátiles de bajo consumo, como redes inalámbricas de sensores [1], actuadores, dispositivos para inteligencia ambiental [2], sistemas médicos [3][4][5].

La energía se puede obtener de diferentes fenómenos físicos: movimiento o vibraciones [6],[7], diferencias de temperatura (efecto Seebeck) [8], efecto fotovoltaico [9], viento, o incluso del adenosín trifosfato [10].

Una alternativa interesante consiste en captar energía de las señales de radiofrecuencia presentes en el entorno [11][12], fenómeno conocido como RF Energy Harvesting (RFEH). A grandes rasgos, un sistema de RFEH captura la señal de RF con una antena sintonizada y la convierte en una tensión continua. Prácticamente en cualquier espacio existe este tipo de energía en mayor o menor medida y puede provenir de antenas de radio/TV comerciales, o de otros equipos que actúan como emisores de energía, como puede ser el caso en identificación por radio frecuencia (RFID) o en implantes cocleares [13].

Este trabajo presenta una práctica de laboratorio cuyo objetivo es introducir al alumno en el mundo de RFEH y dar a conocer sus posibles aplicaciones prácticas. Debido a la relativa novedad del concepto de RFEH, al gran número de potenciales aplicaciones y a sus capacidades didácticas, pues ayuda a aclarar muchos de los conceptos de recepción de señales de radio, se presenta en esta comunicación la experiencia relativa a la implementación de una práctica de laboratorio. La práctica se denomina “*Captura de Energía de Radio Frecuencia*”, y se imparte en la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas, dentro del Máster en Sistemas Electrónicos: Sistemas Inteligentes de la Universidad de Alcalá. El objetivo de la práctica es obtener sin contacto la energía de RF emitida por un teléfono móvil en funcionamiento y alimentar un diodo LED. Previamente el alumno tiene que diseñar y fabricar una antena, caracterizar su respuesta, montar el circuito adecuado y comprobar el funcionamiento del sistema completo.

Este documento se ha organizado del siguiente modo: en la Sección II se describe el Máster y la asignatura en la que se enmarca la práctica. En la Sección III se describen los aspectos tecnológicos y los resultados obtenidos; la Sección IV está dedicada a posibles mejoras a realizar y la sección V a la evaluación y experiencias aprendidas en los tres años de su implementación. Finaliza el documento resaltando sus principales conclusiones

## II. UBICACIÓN DE LA PRÁCTICA

El Máster Universitario en Sistemas Electrónicos Avanzados: Sistemas Inteligentes de la Universidad de Alcalá consta de 90 ECTS (European Credit Transfer System) distribuidos en dos cursos académicos y divididos en 3 módulos. Todas las asignaturas son de 6 ECTS (teóricos-prácticos). El programa se estructura del siguiente modo:

- Módulo obligatorio (30 ECTS): compuesto por 5 asignaturas relacionadas con los sistemas electrónicos.
- Módulo de optatividad (36 ECTS): el alumno debe elegir 6 asignaturas de la oferta existente (12 asignaturas) en áreas de Control y Automatización, Robótica, Comunicaciones e Ingeniería Biomédica.
- Trabajo Fin de Máster (24 ECTS) de carácter obligatorio.

Los alumnos que acceden al Máster provienen de una formación universitaria, como mínimo, de grado (3 años) en áreas de Telecomunicaciones, Informática, Física, Matemáticas, etc. Esto supone que en general, disponen de conocimientos de análisis de señal, modulaciones analógicas y digitales, diseño hardware, manejo de instrumentación electrónica, etc., lo que permite abordar con éxito las asignaturas que configuran el Máster.

Dentro del módulo de optatividad y en el área de Comunicaciones, la asignatura de Comunicaciones Inalámbricas se imparte en el segundo semestre del primer año, durante 15 semanas. Su principal objetivo es que el alumno conozca y ensaye a nivel práctico los sistemas de comunicación inalámbrica más utilizados: comunicaciones de radio (emisión-recepción) y los protocolos ZigBee, Bluetooth y Wi-Fi (Tabla I). El temario tiene puntos en común con otras asignaturas similares impartidas en otras universidades [14][15].

Los créditos ECTS miden la carga de trabajo necesaria por el alumno para alcanzar los objetivos de la asignatura. El esfuerzo necesario para cada asignatura es de 150 horas. Cada crédito ECTS equivale a 25 horas de trabajo del alumno y se programan actividades de asistencia a clase (30 horas de teoría y 15 de prácticas), seminarios o presentaciones de trabajos (6 horas), tutorías individuales (3 horas), estudio individual (83 horas), preparación de trabajos (10 horas) y exámenes (3 horas).

Tabla I. Temporización de la asignatura

TEORÍA (2 horas por semana)	SEMANA	LABORATORIO
1. Introducción y visión general (1 semana)	1	1. Instrumentación y seguridad en el laboratorio (1 hora)
	2	
2. Conceptos básicos: antenas, ecuación de Friis, diagramas de bloque de emisores-receptores (3 semanas)	3	2.A. Captura de energía de RF (2 horas)
	4	
	5	2.B. Captura de energía de RF (2 horas)
3. Protocolo ZigBee (3 semanas)	6	
	7	3.A. Diseño ZigBee (2 horas)
	8	
4. Protocolo Bluetooth (4 semanas)	9	3.B. Diseño ZigBee (2 horas)
	10	
	11	4.A. Práctica Bluetooth (2 horas)
5. Protocolo Wi-Fi (4 semanas)	12	
	13	5.A. Práctica Wi-Fi (2 horas)
	14	
	15	5.B. Práctica Wi-Fi (2 horas)

En la Tabla I se muestra la temporización de la asignatura. Se alternan las clases de teoría con las prácticas de laboratorio; de este modo, al inicio de una práctica de laboratorio el alumno

conoce los conceptos teóricos más importantes para su desarrollo. El temario comprende una presentación inicial de la asignatura, el estudio de los conceptos generales (antenas, propagación de señales, etc.), y los protocolos ZigBee, Bluetooth, Wi-Fi y sus correspondientes prácticas.

El alumno dispone del siguiente material: a) apuntes y las presentaciones del profesor; b) documentación adicional: bibliografía, problemas, ejemplos resueltos; c) tests de autoevaluación; y d) guía completa de la asignatura.

Se evalúa al alumno en la parte teórica mediante un examen escrito y de la parte de laboratorio, siendo el porcentaje del 60% y 40% respectivamente. Para superar la asignatura se tienen que aprobar la parte de teoría y la parte de laboratorio. La nota de laboratorio (4 puntos) se distribuye del siguiente modo: Práctica de captura de energía de RF: 1 punto; protocolo ZigBee: 1 punto; protocolo Bluetooth: 0.5 puntos; protocolo Wi-Fi: 1.5 puntos.

Dentro del tema de Conceptos Básicos de señales y Equipos de Emisión y Recepción de Radio se ubica la práctica de Captura de Energía de RF. Los aspectos que el alumno aprenderá durante su realización son las siguientes:

- Conocer y analizar el proceso de RFEH.
- Estudiar con detalle algunos sistemas que permiten hacer RFEH.
- Diseñar una antena parche básica, fabricarla y obtener su respuesta.
- Diseñar un circuito para captura de energía de RF a partir de un teléfono móvil en funcionamiento, estudiando los componentes más idóneos para el correcto funcionamiento.
- Medir la energía captada a diferentes distancias y diferentes orientaciones emisor-receptor.
- Que sea capaz de proponer nuevas aplicaciones a la posibilidad de captar energía de RF del entorno o de determinados dispositivos electrónicos.

La práctica se realiza en dos sesiones (2.A, 2.B) de 2 horas cada una, separadas una semana. Los grupos de trabajo están formados por 2 alumnos. Antes del inicio de la primera sesión (2.A) los alumnos disponen del enunciado y de la información necesaria. Durante la sesión 2.A el profesor resume los objetivos, resuelve dudas y explica el funcionamiento básico del software de diseño de antenas (Sonnet Lite™). También los alumnos proceden al diseño de la antena, del circuito rectificador y multiplicador y del circuito impreso. Entre la sesión 2.A y 2.B, se procede a la fabricación del circuito impreso y a soldar los componentes.

La primera parte de la sesión 2.B (aproximadamente 1 hora), se realiza en un laboratorio homologado para la realización de medidas de antenas (Centro de Alta Tecnología y Homologación) para caracterizar el funcionamiento de la antena y la segunda parte en el laboratorio de la asignatura.

### III. ASPECTOS TECNOLÓGICOS

Aunque existen dispositivos comerciales para obtener energía de señales de RF, como el circuito P2110 [16], se

considera didácticamente más interesante que el alumno construya su propio sistema, a partir de componentes electrónicos discretos. Para capturar la energía de un teléfono móvil cuando está estableciendo una llamada supone utilizar un circuito sintonizado a la frecuencia adecuada. En su versión más sencilla, este circuito es una “rectenna”, combinación de antena y rectificador [17], dando como salida una tensión continua. La antena se sintoniza a las frecuencias de interés (GSM: 1710-1785 MHz) y la señal se rectifica y se amplifica con un multiplicador de voltaje [18] [19]. La tensión se almacena en un condensador de capacidad elevada.

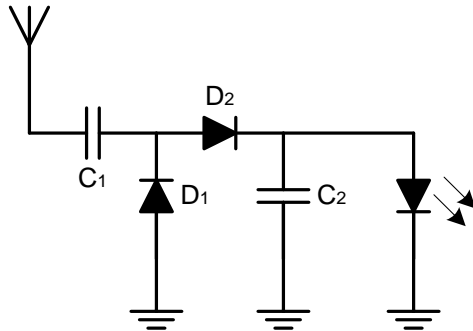


Fig. 1. Diagrama de la rectenna (C1=C2=100nF, D1=D2=BAT62)

En la Figura 1 se muestra uno de los circuitos implementados. La antena se diseña para la banda de 1750 MHz. Se utiliza un multiplicador tipo Villard para rectificar la señal y obtener la señal de salida, que se almacena en C2.

El funcionamiento del multiplicador Villard es el siguiente: para señales de RF negativas, el condensador C1 se carga a la tensión de pico de la señal de entrada (D1 on, D2 off). Durante el semiciclo positivo, la tensión de C1 se suma a la señal de entrada, obteniéndose en C2 el doble de la amplitud de entrada (teóricamente). En la práctica se deben considerar las pérdidas en los diodos, que además deben funcionar en alta frecuencia. Por este motivo se utilizan diodos Schottky de bajo umbral (BAT62), con frecuencia de trabajo de varios GHz (capacidad típica: 0.35 pF).

En el laboratorio se puede ensayar el comportamiento del multiplicador Villard con diferentes tipos de diodos. En la Figura 2 se representa la tensión en C2 utilizando diodos BAT62, diodos OA90 de germanio (VF=0.18 v., C=3 pF) y el modelo 1N4148 (VF= 0.8 v, C= 4 pF). En todos los casos, la amplitud de entrada es 370 mV de pico y la frecuencia de 1.7 GHz.

#### A. Diseño y caracterización de la antena

El grupo de trabajo debe diseñar y caracterizar una antena tipo parche en la banda de 1750-MHz. Para su diseño se utiliza el software Sonnet Lite™ en su versión libre. Esta versión no comercial está limitada a simulaciones que no requieran más de 16 MB de memoria RAM. Debido a esta limitación, es necesario reducir la resolución en la longitud y anchura del diseño, con lo que también se limita la precisión de la simulación.

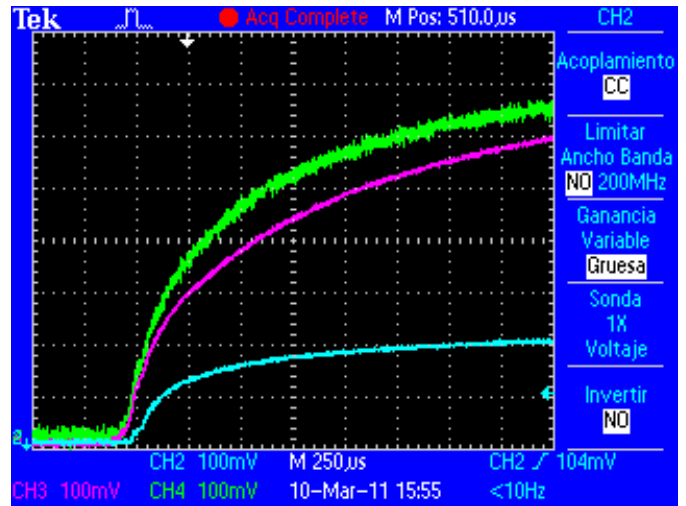


Fig. 2. Tensión en C2 con diferentes modelos de diodos (Verde: BAT62; Violeta: OA90; Azul: 1N4148).

Como diseño de partida se toman las dimensiones de una antena de un teléfono móvil comercial. Mediante el software Sonnet Lite™, los estudiantes obtienen la respuesta de la antena (Fig. 3). Uno de los objetivos de esta tarea es comprobar como pequeñas variaciones en la geometría y dimensiones de la antena provocan grandes cambios en su respuesta.

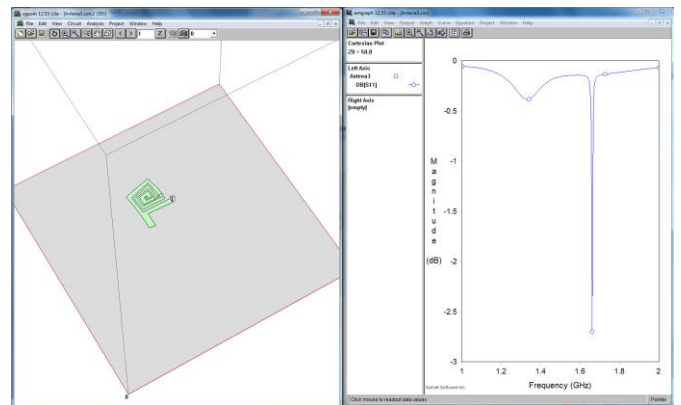


Fig. 3. Diseño de la antena y resultados de la simulación (s11) utilizando Sonnet Lite™

Mediante el software Eagle, los estudiantes diseñan el circuito impreso (Fig. 4). La fabricación se realiza en un laboratorio especializado ubicado en la misma Escuela Politécnica y los propios estudiantes sueldan los componentes electrónicos.

La caracterización de la antena (sesión 2.B) se realiza en el Centro de Alta Tecnología y Homologación de la Universidad de Alcalá, por parte del personal técnico de este centro, en colaboración con los alumnos, que reciben explicaciones sobre el proceso realizado. El diagrama de radiación se mide en una cámara anecoica (dimensiones: 6.26m. x 3.96 m. x 3.96 m.) con un medidor de potencia de radio frecuencia modelo

Agilent E4418B. Se utiliza un sistema de medida de antenas esférico ubicado en el interior de la cámara anecoica (Fig. 5).

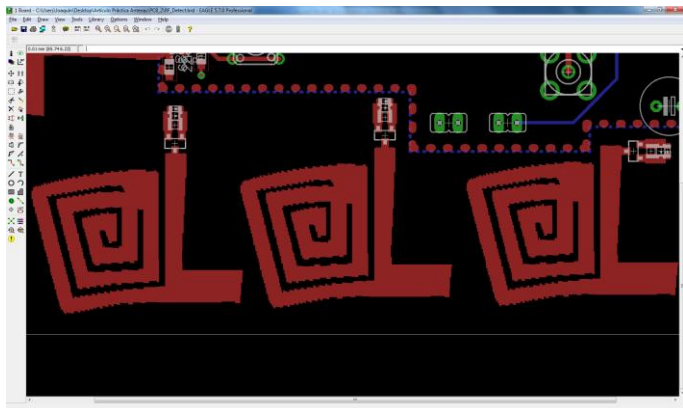


Fig. 4. Diseño del circuito impreso.

Las medidas se realizan con la antena en recepción, con una sonda (antena transmisora) alineada con la antena bajo test. Mediante el medidor de potencia y un controlador de posición se registran los valores medidos por la antena en función de la posición de la misma, obteniendo los diagramas de radiación.

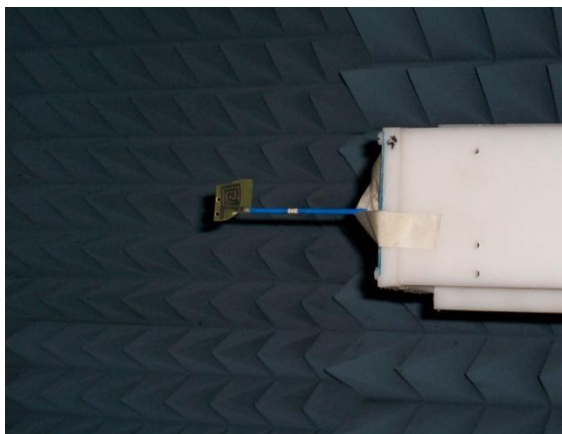


Fig. 5. Ubicación de la antena en la cámara anecoica

La medida del coeficiente de reflexión (S11) se realiza directamente sobre uno de los puertos del medidor de potencia de RF, previa calibración del mismo. Para la medida de ganancia se utiliza el método de sustitución de antena: apoyándose en una antena patrón de ganancia conocida se obtiene la ganancia de la antena bajo test por comparación de los niveles medidos. El grupo de trabajo se lleva los informes gráficos de las medidas realizadas sobre su antena (Fig. 6). Como puede comprobarse en la figura 6, normalmente los resultados prácticos no coinciden con los teóricos, pues pequeñas variaciones en la fabricación de la antena influyen en su respuesta.

Las discrepancias entre la simulación (Fig. 3) y los resultados prácticos en la cámara anecoica (Fig. 6) se deben a los siguientes factores:

- Restricciones en el software libre de simulación, ya comentadas.

- El software solamente simula el diseño de la antena. Sin embargo, en la cámara anecoica se tiene en cuenta el circuito ensamblado con sus conectores.

Estas diferencias entre simulación y valores reales son normales en el diseño electrónico y este ejercicio permite que el alumno se familiarice con esta realidad.

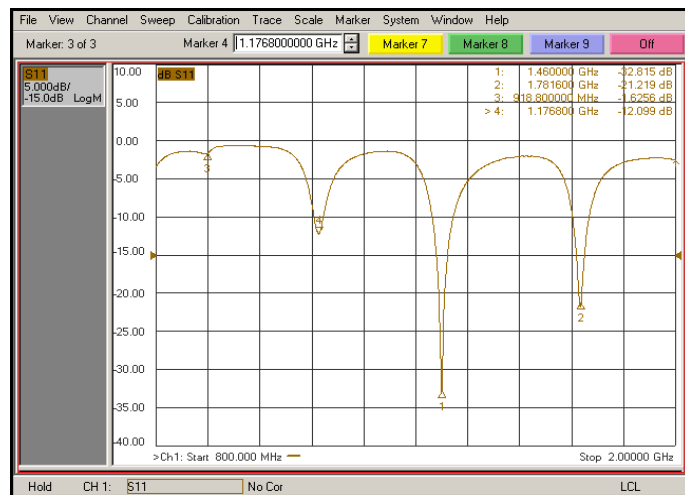


Fig. 6. Coeficiente de reflexión (S11) de una antena

### B. Prueba del circuito

Una vez caracterizada la antena, se procede a la realización de las pruebas para comprobar el funcionamiento del sistema RFEH. La primera prueba consiste en la medida de la tensión captada en función de la distancia a la fuente de energía (teléfono móvil). En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la tensión obtenida a diferentes distancias del teléfono móvil mientras se realiza una llamada. Cuando el teléfono está inactivo, la señal obtenida es mínima. Al establecer una llamada, la potencia obtenida varía de forma inversa con la distancia. La respuesta también depende de la orientación relativa entre ambas antenas, por lo que el alumno tiene la posibilidad de explorar la influencia de la polarización para la transferencia de energía.

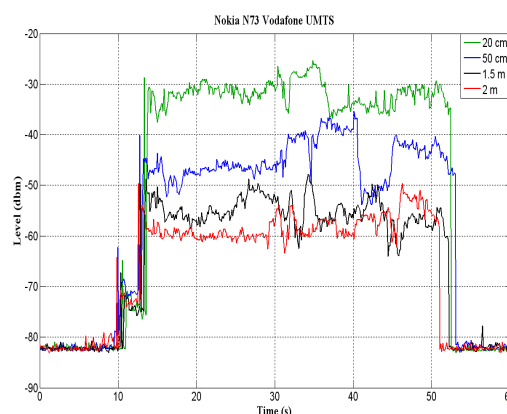


Fig. 7. Potencia obtenida a diferentes distancias



Fig. 8. Iluminación de un diodo LED

La siguiente comprobación consiste en acercar el circuito diseñado por los alumnos a un teléfono móvil que tiene establecida una llamada y si el sistema es capaz de captar la energía suficiente para iluminar un diodo LED. En la fotografía de la figura 8 se comprueba como es posible la activación del diodo LED. Se ha utilizado un terminal Sony-Ericsson K800i con una potencia de salida de 2W.

#### IV. MEJORAS PROPUESTAS A LA PRÁCTICA

Entre las mejoras que pueden implementarse sobre la idea expuesta hasta ahora, se incluyen las siguientes: a) obtención de energía de otras fuentes, como puede ser una emisora comercial de TV o radio en la banda de FM (87.5–108 MHz); b) utilizar varios circuitos RFEH en paralelo, cada uno sintonizado a una frecuencia, incrementando de este modo la energía capturada; c) prueba de un multiplicador Villard de varias etapas, como el multiplicador de Greinacher [20]; d) utilización del circuito comercial P2100 con un supercondensador; e) diseño de un circuito especializado en la generación de una señal de RF, de igual modo que RFID o f) utilizar un sintonizador entre la antena y el multiplicador, para obtener la máxima tensión de salida.

El tiempo dedicado a esta práctica (4 horas) impide la realización de estas mejoras. Sin embargo, se recomienda que en la memoria entregada por los estudiantes se analice alguna de estas alternativas; este análisis permite evaluar con mayor precisión el rendimiento del grupo de trabajo.

#### V. VALORACIÓN DE LA PRÁCTICA

Esta práctica se ha realizado en tres cursos académicos: 2007–2010. Un total de 38 (12 +16 +10) estudiantes han participado formando grupos de 2 personas. El criterio de calificación (1 punto) ha sido:

- Realización práctica + demostración de funcionamiento y respuesta de las preguntas del profesor: 75%.
- Memoria escrita: 25%. En este documento se ha valorado especialmente el apartado dedicado a posibles mejoras y aplicaciones de la práctica.

De los 38 estudiantes que han realizado la práctica durante los 3 cursos académicos, la nota media ha sido 0.74 (Figura 9). Por año, la media ha sido 0.80, 0.67 y 0.77, respectivamente.

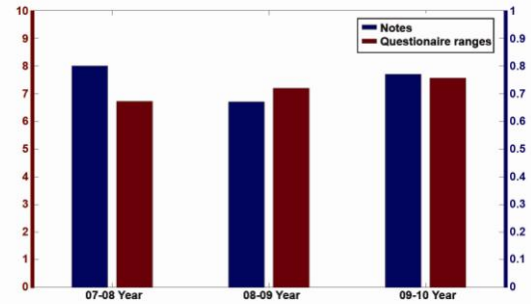


Fig. 9. Notas de la práctica y resultado de las encuestas

Al final del curso, se realiza una encuesta anónima antes de que los alumnos conozcan su nota final. La encuesta plantea cuestiones relativas al curso completo, incluyendo la actividad del profesor, documentación disponible, grado de dificultad de los exámenes, etc. Una de las cuestiones pregunta al alumno sobre el grado de interés y la documentación disponible de esta práctica. En una escala de 0-10, se han recogido 31 respuestas con una valoración media de 7.12. Analizando las respuestas por año académico, el primer año el valor medio ha sido 6.72 (n=10), el segundo 7.19 (n=11) y el tercer año 7.56 (n=9). Consideramos que esta evolución positiva se debe a las mejoras realizadas en la documentación inicial.

En la encuesta, el estudiante tiene la oportunidad de comentar los aspectos más relevantes de la asignatura. De las 31 encuestas disponibles, 8 han incluido comentarios sobre esta práctica, considerando la misma muy interesante, principalmente por tener la oportunidad de diseñar una antena de parche y caracterizar la misma en un laboratorio con instrumentación profesional.

#### VI. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha presentado una práctica de laboratorio para la captura de energía a partir de señales de RF. Además de los conceptos relativos a la captura de energía, permitir abordar aspectos sobre diseño de antenas, sintonización de señales, rectificación en alta frecuencia, simulación, medida de parámetros en condiciones reales, etc.

Las encuestas realizadas a los alumnos indican que consideran muy interesante el trabajo planteado.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración del Centro de Alta Tecnología y Homologación de la Universidad de Alcalá en la realización de las medidas prácticas.

## REFERENCIAS

- [1] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre, Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no 7, pp. 669–676, 2002.
- [2] L. Benini, E. Farella, and C. Guiducci, Wireless sensor networks: Enabling technology for ambient intelligence, *Microelectronics Journal*, vol. 37, no 12, pp. 1639–1649, 2006.
- [3] E. K. Reilly, E. Carleton, and P. K. Wright, Thin film piezoelectric energy scavenging systems for long term medical monitoring, *International Workshop on Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, 2006. BSN 2006.
- [4] B. Gyselinckx, J. Penders and R. Vullers, Potential and challenges of body area networks for cardiac monitoring, *Journal of Electrocardiology*, vol. 40, no 6, Supplement 1, pp. S165–S168, November–December 2007.
- [5] Z. Xiaoyu, J. Hanjun, Z. Lingwei, Z. Chun, W. Zhihua and C. Xinkai, An energy-efficient ASIC for wireless body sensor networks in medical applications, *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 4, no 1, pp 11–18, 2010.
- [6] P. D. Mitcheson, T. C. Green, E. M. Yeatman, and A. S. Holmes, Architectures for vibration-driven micropower generators, *J. Microelectromechanical Systems*, vol. 13, no 3, pp. 429–440, 2004.
- [7] N.S. Schenck and J.A. Paradiso, Energy scavenging with Shoe-Mounted piezoelectrics, *IEEE Micro*, vol. 21, no 3, pp. 30–42, 2001.
- [8] D. Samson, M. Kluge, T. Becker, and U. Schmid, Energy harvesting for remote monitoring of aircraft seats, *Sensor Letters*, vol. 8, no 2, pp. 328–335(8), April 2010.
- [9] J. A. Paradiso and T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no 1, pp. 18–27, 2005.
- [10] Z. L. Wang, Energy harvesting for self-powered nanosystems, *Nano Research* vol. 1, no 1, pp. 1–8, 2008.
- [11] A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powlledge, A. V. Mamishev, and J. R. Smith, Design of an RFID-Based Battery-Free programmable sensing platform, *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 11, pp. 2608 – 2615, 2008.
- [12] B. Jiang, J. R. Smith, M. Philipose, S. Roy, K. Sundara-Rajan, and A. V. Mamishev, Energy scavenging for inductively coupled passive RFID systems, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE*
- [13] C.-S.A. Gong, Muh-Tian Shiue, Kai-Wen Yao, Tong-Yi Chen, Yin Chang, and Chun-Hsien Su, A truly Low-Cost High-Efficiency ASK demodulator based on Self-Sampling scheme for bioimplantable applications, *IEEE Trans. on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no 6, pp. 1464 – 1477, 2008.
- [14] N. I. Sarkar and T. M. Craig, Teaching wireless communication and networking fundamentals using Wi-Fi projects, *IEEE Trans. Educ.*, vol. 49, no 1, pp. 98–104, Feb. 2006.
- [15] Virginia Tech, New course gives students hands-on experience with network interface, wireless networking, Mar. 7, 2011 [Online]. Available: <http://www.ecpe.vt.edu/news/ar03/newcourse.html>
- [16] <http://www.powercastco.com/>
- [17] J. A. G. Akkermans, M. C. van Beurden, G. J. N. Doodeman, and H. J. Visser, Analytical models for low-power rectenna design, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 187–190, 2005.
- [18] H. Yan, J. G. Macías Montero, A. Akhnoukh, L.C.N. de Vreede, and J. N. Burghartz, An integration scheme for RF power harvesting, In *Proceedings of the SAFE 2005 Conference*, Utrecht, The Netherlands, 2005; pp. 64–66.
- [19] P. Hudec, M. Polivka, and P. Pechac, Microwave system for the detection and localization of mobile phones in large buildings, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, pp. 2235–2239, 2005.
- [20] J. P. Curty, M. Declercq, and C. Dehollain, Design and optimization of passive UHF RFID systems. Springer, 2007.