

# DETECCIÓN DE TEMPERATURA EN RADIOFRECUENCIA APROVECHANDO LA CARACTERÍSTICA NO LINEAL DE UNA UNIÓN SCHOTTKY

T. Aballo<sup>(1)</sup>, L. Cabria<sup>(1)</sup>, J. A. García<sup>(1)</sup>, T. Fernández<sup>(1)</sup> y F. R. Marante<sup>(2)</sup>

[teofilo@dicom.unican.es](mailto:teofilo@dicom.unican.es), [larena@dicom.unican.es](mailto:larena@dicom.unican.es), [joseangel.garcia@unican.es](mailto:joseangel.garcia@unican.es), [fernandt@unican.es](mailto:fernandt@unican.es), [marante@electronica.ispjae.edu.cu](mailto:marante@electronica.ispjae.edu.cu)

<sup>(1)</sup> Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria, Avda. de los Castros s/n 39005, Santander, España.

<sup>(2)</sup> Dpto. Telecomunicaciones, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría", Ciudad Habana, Cuba.

**Abstract-** This paper presents a cost effective solution for remote radiofrequency temperature sensing, taking advantage of a Schottky junction nonlinear characteristic and the device integration in a properly designed dual-frequency radiator. Once the proposed integrated active antenna is interrogated with a CW excitation, the level and phase of the third harmonic response signal gives information of the tag temperature to be controlled.

## I. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años ha surgido un tremendo interés por el desarrollo de transpondedores de bajo coste para su empleo en los sistemas inalámbricos modernos. Tal es el caso, por ejemplo, de la identificación por radiofrecuencia (RFID) o de las aplicaciones con redes de sensores, donde se fuerza a un transpondedor "tag" a responder con información una vez que es interrogado por un lector [1].

Las antenas integradas activas [2] constituyen una alternativa prometedora en la búsqueda de soluciones de alto rendimiento y coste adecuado en este campo. Al combinar las características de los radiadores impresos con las propias de los dispositivos activos, han posibilitado la aparición de una amplia variedad de soluciones en la forma de backscatters sencillos con respuesta en AM [3], SSB [4] o en otros formatos de modulación. En las aplicaciones donde se producen con frecuencia reflexiones de la señal de interrogación sobre los objetos a la vista, se pueden evitar las interferencias sobre la respuesta esperada mediante el empleo de armónicos [5].

En este artículo se propone una solución de bajo coste de este último tipo. Aprovechando la característica no lineal de una unión Schottky, la amplitud y la fase del tercer armónico de la señal de interrogación pueden ser utilizadas para detectar la temperatura de la etiqueta. En primer lugar, se realiza una breve descripción del comportamiento no lineal de dicha unión, basada en un procedimiento de caracterización especializado. A continuación, se presentan detalles del parche de doble frecuencia diseñado, para terminar con los resultados de medida del elemento sensor RFID propuesto.

## II. DERIVADAS DE LA NO LINEALIDAD RESISTIVA DE UNA UNIÓN SCHOTTKY

En régimen de pequeña señal, la generación de armónicos en un dispositivo no lineal puede asociarse a las derivadas de orden superior de las características I/V y Q/V del mismo [6], [7]. En la vecindad del punto de operación, las no linealidades pueden ser perfectamente descritas usando un desarrollo en Serie de Taylor, donde las derivadas mencionadas definen los coeficientes de dicha expansión.

En la Fig. 1, se ha representado el ampliamente conocido circuito equivalente de una unión Schottky (válido para un diodo Schottky, el contacto puerta canal de un dispositivo FET, etc).

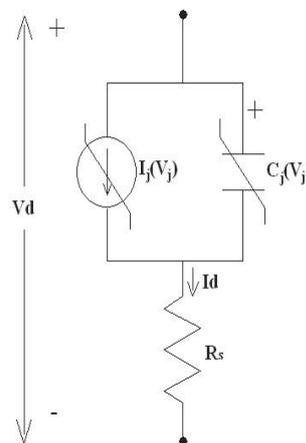


Fig. 1. Circuito equivalente de una unión Schottky.

A frecuencias bajas de operación se puede ignorar, en una primera aproximación, la contribución de la capacidad. La característica  $I_d(V_d)$  quedaría expresada de la siguiente manera:

$$I_d(V_d) = I_D(V_D) + id(vd) = I_D(V_D) + G_{d1} \cdot vd + G_{d2} \cdot vd^2 + G_{d3} \cdot vd^3 \quad (1)$$

donde  $I_D$  y  $V_D$  representan los valores de DC, mientras que  $id$  y  $vd$  las componentes de pequeña señal. Cada coeficiente de la Serie de Taylor en (1) se define como

$$G_{dn} = \frac{1}{n!} \cdot \left. \frac{d^n Id(Vd)}{dVd^n} \right|_{V_D} \quad (2)$$

**A. Extracción experimental**

Partiendo de una medida del parámetro  $S_{11}$  en un analizador de redes, se puede obtener fácilmente el coeficiente de primer orden  $G_{d1}$ . Por otro lado, las derivadas segunda y tercera se pueden extraer consecutivamente de las medidas de distorsión armónica en modo de reflexión, ver esquema de la Fig.2. Analizando el circuito equivalente mediante Series de Volterra (a través del método de las corrientes no lineales),  $G_{d2}$  y  $G_{d3}$  quedan definidas como:

$$G_{d2} = \frac{2 \cdot Id(\omega) \cdot [1 + G_{d1} \cdot R_{gen}]^3}{Vgen^2(\omega)} \quad (3)$$

$$G_{d3} = \frac{4 \cdot Id(3\omega) \cdot [1 + G_{d1} \cdot R_{gen}]^4}{Vgen^3(\omega)} + \frac{2 \cdot G_{d2}^2 \cdot R_{gen}}{[1 + G_{d1} \cdot R_{gen}]} \quad (4)$$

donde  $Vgen$  y  $R_{gen}$  son los valores del generador equivalente de Thevenin, visto desde el terminal de la unión.

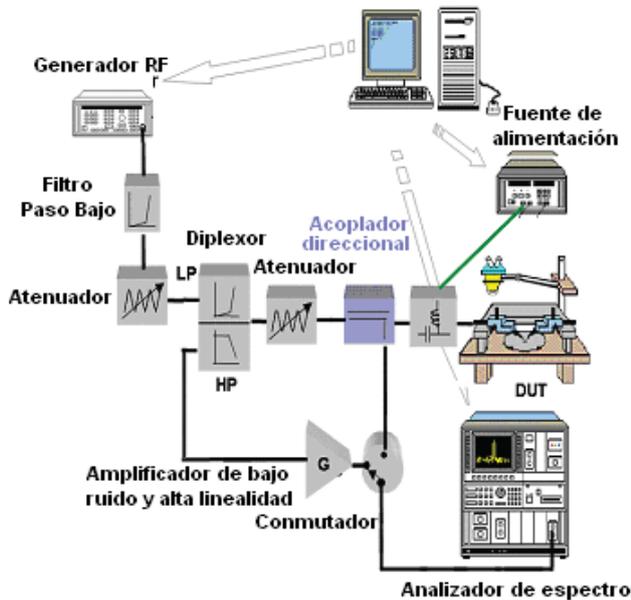


Fig. 2. Sistema experimental para la extracción de las derivadas

A modo ilustrativo, se seleccionó para su caracterización el diodo Schottky HSMS-2860 de Agilent Semiconductors. En la Fig. 3, se muestran los resultados de la evolución de las derivadas extraídas. La conductancia equivalente del diodo tiende a un valor constante por encima de la tensión de conducción, valor correspondiente al inverso de la resistencia parásita en serie,  $R_s$ , tal y como era de esperar. La segunda y tercera derivadas tienen, respectivamente, un valor máximo y un nulo en la transición del estado de apagado o corte a encendido o conducción.

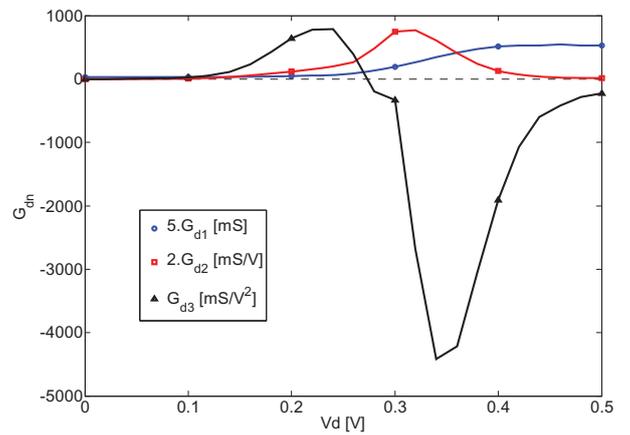


Fig. 3. Evolución de  $G_{d1}$ ,  $G_{d2}$  y  $G_{d3}$  con la tensión de polarización.

**B. Dependencia con la temperatura**

Con el fin de considerar ahora el papel de la temperatura, conviene recordar en (5) la ecuación para la característica I/V de la mencionada unión,

$$I_j(V_j) = I_s \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V_j}{nKT}} - 1 \right) \quad (5)$$

Esta dependencia se ha utilizado en el pasado para detectar temperatura. En un trabajo clásico [8], orientado a la extracción de la resistencia térmica de un FET, Fukui calibró la tensión de puerta a un valor fijo de corriente en función de la temperatura. Sin embargo, para propósitos de RFID, la variación de dicha tensión de DC con la temperatura habría de convertirse digitalmente para poder ser entonces usada en el proceso de remodulación [9]. Este tipo de solución requiere consumo de potencia DC, limitando en la mayoría de los casos la distancia útil entre el interrogador y el transpondedor.

Era de esperar que el efecto de la temperatura en (5) fuese también evidente sobre las derivadas de orden superior de la unión. Bajo esta premisa se repitió el proceso de caracterización anterior para una rango de 5 a 60°C, observándose que la posición en tensión a la que aparecía el nulo de  $G_{d3}$  disminuía con la temperatura, como se muestra en Fig. 4.

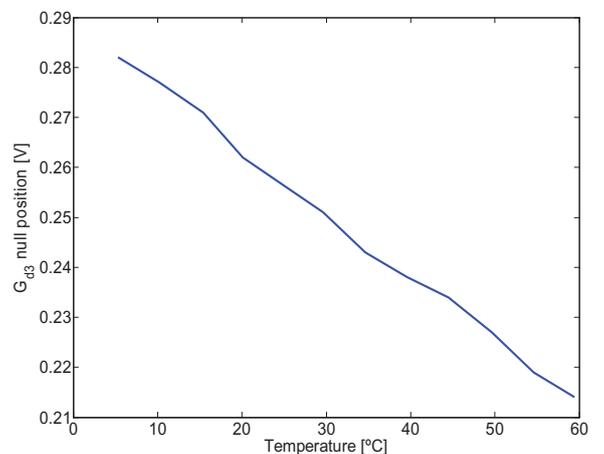


Fig. 4. Posición del nulo de  $G_{d3}$  en dependencia con la temperatura

Considerando los resultados de las Figs. 3 y 4, surge la idea de una técnica alternativa para la detección de la temperatura mediante radiofrecuencia. Polarizando el dispositivo justo donde la tercera derivada es nula a temperatura normal, el valor de  $G_{d3}$  se convertiría en positivo si la temperatura bajase mientras que sería negativo en caso contrario (se incrementa).

Ya que este parámetro determina la generación armónica de tercer orden, al excitar el dispositivo con una señal de onda continua (CW) de pequeño nivel, un interrogador RFID capaz de detectar la amplitud y la fase relativa de tal armónico podría sensar entonces la temperatura de la etiqueta de una manera sencilla y eficiente.

### III. PARCHE DE DOBLE FRECUENCIA

Para integrar el diodo Schottky en un transpondedor RFID, se diseñó un parche acoplado por ranura de doble frecuencia [10], ver Fig. 5.

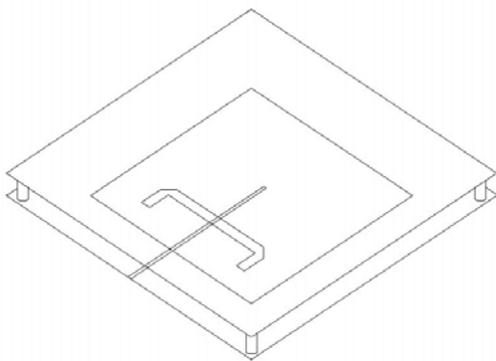


Fig. 5. Detalles de la geometría del parche cuadrado seleccionado.

Optimizando las dimensiones del parche, del stub y de la ranura se pudieron obtener funcionamientos aceptables en los modos  $TM_{10}$  y  $TM_{30}$ . En la Fig. 6 se presentan las medidas de la adaptación de entrada realizadas sobre la antena. Dichos resultados confirman la relación armónica deseada entre las frecuencias de resonancia de ambos modos, a 990 MHz y 2970 MHz respectivamente.

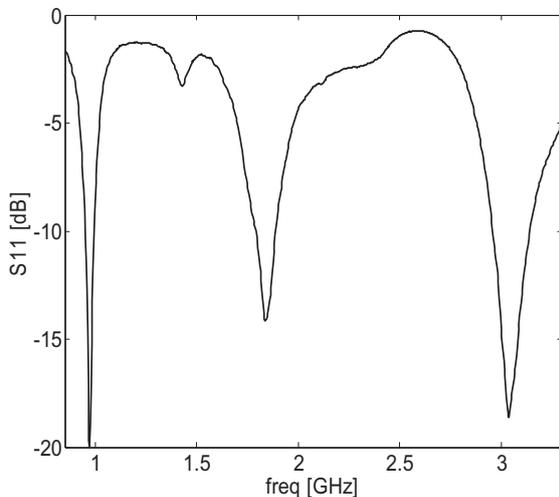


Fig. 6. Medida de la adaptación de entrada de la antena

### IV. RESULTADOS DE LA MEDIDA DEL TRANSPONDEDOR RFID

Finalmente, se realizó la conexión entre el diodo previamente caracterizado y la antena diseñada para conformar el transpondedor aquí propuesto para el sensado de temperatura.

Se implementó además un sistema de medidas en radiación para la caracterización vectorial de la señal de respuesta al tercer armónico, sistema representado de forma simplificada en la Fig. 7. Una celda Peltier permitió el control de la temperatura de la etiqueta de un modo sencillo.

Tras la transmisión de una señal de onda continua a 990 MHz, se detectaron de vuelta en el interrogador la amplitud y la fase de la señal generada por la unión a 2970 MHz. El diodo Schottky sensor se polarizó en la posición del nulo de  $G_{d3}$  para una temperatura de 20°C,  $V_d = 0.259V$ . Para recibir y detectar adecuadamente la señal de respuesta se empleó un analizador vectorial de señal (VSA) 89600 de Agilent Technologies.

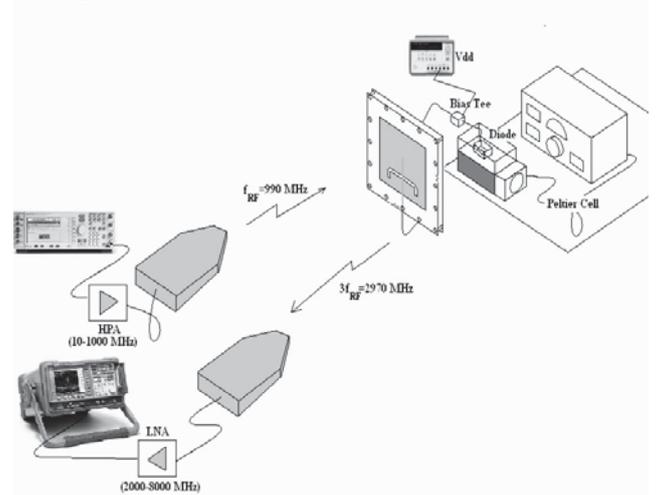


Fig. 7. Sistema de medida para la caracterización armónica en backscattering.

En la Fig. 8 se muestran los valores de tensión detectados en función de la temperatura. Dichos resultados validan la técnica propuesta.

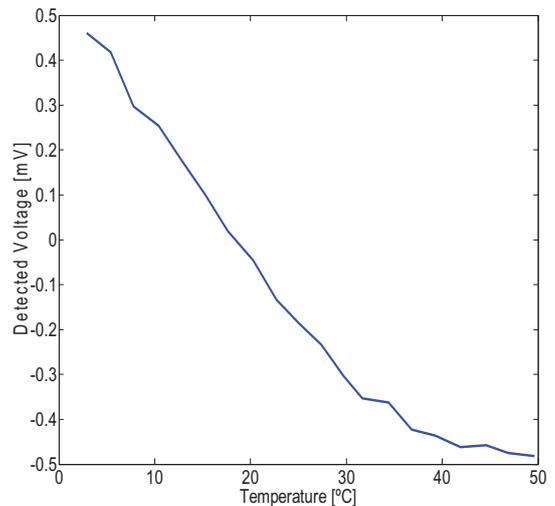


Fig. 8. Valores de tensión detectados, empleando el analizador vectorial de señal, en función de la temperatura.

El rango de temperatura para el cual la tensión detectada sigue un variación aproximadamente lineal fue de aproximadamente  $30^{\circ}\text{C}$ , aunque es posible establecer una relación monótona en un rango mayor cercano a los  $60^{\circ}\text{C}$ .

#### V. CONCLUSIONES

Se ha implementado una solución sencilla y efectiva para la detección remota de la temperatura mediante radiofrecuencia, aprovechando la característica no lineal de una unión Schottky. La integración de un diodo en un parche de doble frecuencia, adecuadamente diseñado, ha permitido de forma simultánea la recepción de la señal CW de interrogación y la retransmisión de la señal de respuesta al tercer armónico.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación proporcionada por el Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) a través del proyecto TEC2005-07985-C03-01/TCM. Este trabajo también es fruto de la colaboración entre instituciones europeas dentro de la red de Excelencia TARGET del 6<sup>to</sup> Programa Marco.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Mawhinney, "Microwave tag identification systems", *RCA REV.*, vol.44, pp. 558-610, Dec. 1983.
- [2] J.A. Navarro, and K. Chang, *Integrated Active Antennas and Spatial Power Combining*, Wiley, New York, 1996.
- [3] "An automatic vehicle ID system for toll," *Laurence Livermore National Laboratory, Rep. No. UCRL-TB-113409*, April.1993.
- [4] T. Ohta, H.Nakano, and M. Tokuda, "Compact Microwave Remote recognition system with newly developed SSB modulation," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, June 1990, pp. 957-960.
- [5] R. Page, "A low power RFID transponder," *RF Design*, pp. 31-36, July 1993.
- [6] S.A Maas, *Nonlinear Microwave and RF Circuits*, Artech House, 2003.
- [7] J. C. Pedro and N. Borges, *Intermodulation Distortion in Microwave and Wireless Circuits*, Artech House, 2003.
- [8] H. Fukui, "Thermal resistance of GaAs field-effect transistor," *1980 Int. Electron Device Meeting*, pp. 118-121, Dec.1980.
- [9] R. Kuchta, P.Stefan, Z. Barton, R.Vrba, and M. Sveda, "'Wireless temperature data logger,'" *2005 Asian Conf. on Sensor*, pp.208-212, Kuala Lumpur , Sept.2005.
- [10] D. M. Pozar, "A Microstrip antenna aperture coupled to a microstrip line," *Electronic Lett.*, vol. 21, pp. 49-50, Jan. 1985.