

# **DISEÑO DE UN SENSOR DE TRANSFERENCIA DE CAMPO ELECTRICO**

*Ing. Pablo A. Perri*

Centro de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones, Electrónica e Informática - CITEI  
Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI  
CC 157, (1650) San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina  
pperri@inti.gov.ar

## **ABSTRACT**

This work describes the design of a miniature electric field sensor in the frequency range from 10MHz to 1GHz. This sensor can be used as a transfer instrument of electric field between a calibration laboratory and an EMC (ElectroMagnetic Compatibility) test facility.

The sensor has the shape of a small parallel plates capacitor and a schottky diode that works as a detector is placed between its plates. The sensor also has a low pass filter that allows to extract the DC component from the output of the detector. The DC component is transmitted by a high resistivity transmission line, in order to avoid distortion of the electric field that is desired to measure, to a digital voltmeter to obtain the reading of the measurement.

## **RESUMEN**

Este trabajo describe el diseño de un sensor de campo eléctrico miniatura en el rango de frecuencias de 10MHz a 1GHz. Este sensor puede ser utilizado como instrumento de transferencia de campo eléctrico entre un laboratorio de calibración y una instalación de ensayo de EMC (ElectroMagnetic Compatibility).

El sensor tiene la forma de un capacitor de placas paralelas pequeño y entre sus placas se encuentra un diodo schottky que actúa como detector. El sensor también tiene un filtro pasa bajos que permite extraer la componente continua de la salida del detector. La componente continua se transmite mediante una línea de transmisión de alta resistividad, para no distorsionar el campo eléctrico que se desea medir, a un voltímetro digital para obtener la lectura de la medición.

# DISEÑO DE UN SENSOR DE TRANSFERENCIA DE CAMPO ELECTRICO

Ing. Pablo A. Perri

Centro de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones, Electrónica e Informática - CITEI  
Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI  
CC 157, (1650) San Martín, Pcia. de Buenos Aires, Argentina  
pperri@inti.gov.ar

## ABSTRACT

Este trabajo describe el diseño de un sensor de campo eléctrico miniatura en el rango de frecuencias de 10MHz a 1GHz. Este sensor puede ser utilizado como instrumento de transferencia de campo eléctrico entre un laboratorio de calibración y una instalación de ensayo de EMC (ElectroMagnetic Compatibility).

El sensor tiene la forma de un capacitor de placas paralelas pequeño y entre sus placas se encuentra un diodo schottky que actúa como detector. El sensor también tiene un filtro pasa bajos que permite extraer la componente continua de la salida del detector. La componente continua se transmite mediante una línea de transmisión de alta resistividad, para no distorsionar el campo eléctrico que se desea medir, a un voltímetro digital para obtener la lectura de la medición.

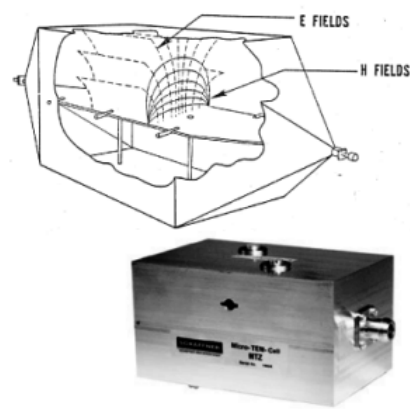


Fig.1. Celda  $\mu$ TEM

## 1. INTRODUCCION

En la actualidad se utilizan medidores de intensidad de campo eléctrico de RF para medir radiaciones no ionizantes para la seguridad ocupacional y también en laboratorios de EMC acreditados para establecer un determinado nivel de campo conocido para realizar ensayos. Ambas aplicaciones implican decisiones importantes que se basan en la lectura del medidor de campo, por lo tanto su incertidumbre de medición debería ser tan baja como sea posible y su calibración trazable a los patrones nacionales.

Considerando los medidores de intensidad de campo comerciales la incertidumbre es bastante grande (1 a 3dB). Por lo tanto, para lograr una mejora en la incertidumbre de medición, se estudió los principios de construcción del medidor [1] y el método de calibración utilizando una celda TEM ([2] – [3]) miniatura llamada “ $\mu$ TEM” (Fig.1) para generar un campo eléctrico de referencia y el empleo de un sensor miniatura para ser calibrado dentro de la celda  $\mu$ TEM (Fig. 2).[4]

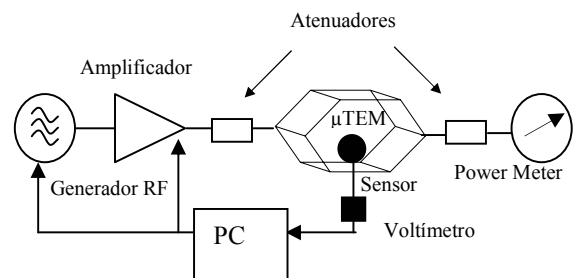


Fig. 2. Calibración del sensor de campo eléctrico

### 1.1. Calibración del sensor con la celda $\mu$ TEM.

La pequeña celda  $\mu$ TEM ofrece un modo de operación TEM (Transversal electromagnético) puro hasta 1 GHz y se la utiliza para obtener un campo eléctrico de referencia. Esta celda es ubicada entre un generador de RF y un medidor de potencia con dos atenuadores de precisión

(Fig. 2). La intensidad de campo dentro de la misma se calcula de acuerdo a:

$$E = \frac{\sqrt{Z_L \cdot A \cdot P_M}}{d} \quad (1)$$

donde:

$E$	intensidad de campo eléctrico.
$Z_L$	impedancia característica de la celda.
$A$	Factor de atenuación.
$P_M$	Potencia RF medida.
$d$	Altura del conductor central.

Utilizando instrumentos calibrados con trazabilidad para medir parámetros S (scattering), potencia de RF y longitud, las magnitudes  $Z_L$ ,  $A$ ,  $P_M$  y  $d$  pueden ser medidas con una relativa baja incertidumbre, por lo tanto se puede obtener la trazabilidad de la intensidad de campo eléctrico mediante estas magnitudes.

Calibrando el sensor miniatura usando este método se puede lograr incertidumbres de medición menores a 1dB. [4]

## 2. SENSOR DE CAMPO ELÉCTRICO

Debido a que las dimensiones del lugar donde se puede medir el campo eléctrico de referencia son muy reducidas y que los sensores de campo estándar no se pueden acomodar a dicho lugar, se desarrolló un sensor miniatura para poder ser calibrado en dicha celda y poder transferir el campo de referencia dentro de la celda  $\mu$ TEM a otro lugar mas grande y útil para poder realizar mediciones y ensayos de EMC.

El sensor está constituido por un par de placas paralelas tipo capacitor disco plano y un diodo schottky entre sus placas que trabaja sin polarización como detector. Cuando este capacitor junto con el diodo se expone a campos de RF, aparece entre sus placas una señal con una pequeña componente continua, la cual se transmite a un voltímetro de continua por medio de un filtro pasa bajos y un par de cables de alta resistividad. Luego se podrá conectar el voltímetro a una PC donde se podrá corregir los valores medidos afectándolos por factores de efecto de temperatura, linealidad y respuesta en frecuencia. Con este tipo de sensor se puede medir campo eléctrico en alta frecuencia sin perturbar significativamente el campo que se desea medir.

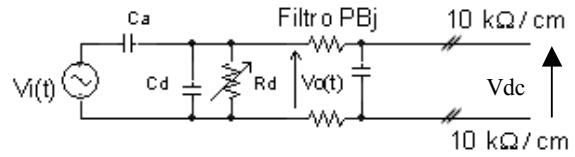


Fig. 3. Circuito equivalente

### 2.1. Análisis Teórico.

El circuito equivalente Thevenin de un diodo conectado entre dos placas paralelas que actúan como sensor de campo eléctrico es el que se muestra en la figura 3. La señal  $V_i(t)$  es la tensión a circuito abierto inducida por un campo eléctrico y está dado por:

$$V_i(t) = \frac{Ei(t) \cdot d}{\xi_r} \quad (2)$$

Donde  $Ei(t)$  es el campo eléctrico perpendicular a las placas,  $d$  es la separación entre placas y  $\xi_r$  es la constante dieléctrica del capacitor.  $Ca$  representa la capacidad formada por las placas. La capacidad  $Cd$  y la resistencia alineal  $Rd$  representa el modelo simplificado del diodo. Se eligió un diodo schottky como detector de resistencia alineal dado que este tiene una muy buena performance en alta frecuencia dada su baja capacidad de juntura, alta sensibilidad y bajo ruido. La alinealidad de la resistencia del diodo está dada por su relación  $v$ - $i$  característica:

$$i(t) = I_s \cdot \left( e^{\alpha \cdot v_o(t)} - 1 \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{q}{n \cdot k \cdot T} \quad (4)$$

Donde  $i(t)$  es la corriente en el diodo y  $v_o(t)$  es la tensión en el mismo,  $I_s$  es la corriente de saturación,  $q$  es la carga electrónica,  $n$  es el factor de idealidad del diodo,  $k$  la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura en grados Kelvin.

Cuando la tensión inducida  $V_i(t)$  es una señal senoidal periódica, siguiendo la técnica analítica desarrollada en [5] se concluye que:

Para valores pequeños de  $V_i$  (ej.: debajo de los 50mV) la tensión continua detectada sigue una ley cuadrática:

$$V_{dc} = -\frac{\alpha}{4} \cdot \left[ \frac{V_i}{1 + \frac{Cd}{Ca}} \right]^2 \quad (5)$$

Y, para valores grandes de  $V_i$  (ej.: por arriba de 500mV) la tensión continua detectada sigue una ley lineal:

$$V_{dc} = -\frac{V_i}{1 + \frac{Cd}{Ca}} \quad (6)$$

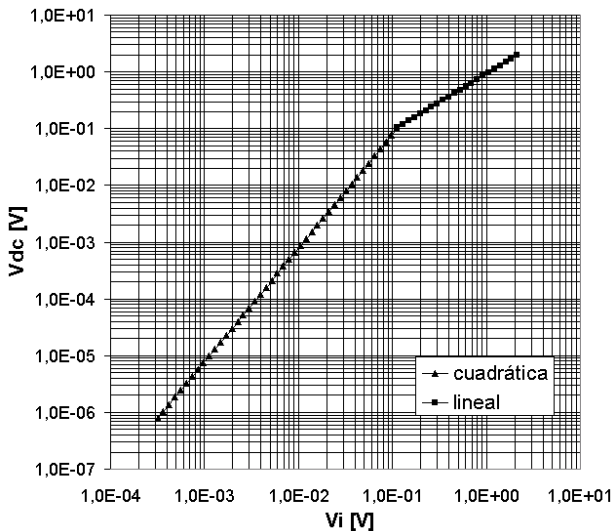


Fig. 4. Curva teórica de la respuesta del sensor.

La Fig.4 muestra la curva teórica de la tensión continua  $V_{dc}$  detectada por el sensor en función de la tensión  $V_i$  inducida por un campo eléctrico perpendicular a las placas del sensor y a una frecuencia de 100 MHz con una relación  $Cd/Ca$  de 0,1.

## 2.2. Diseño del sensor.

El sensor desarrollado se muestra en la Figura 5. Este fue diseñado para operar en el rango de frecuencias de 10 MHz a 1 GHz, se utilizó una placa epoxy como sustrato del mismo, sobre la cual se realizó un capacitor de dos discos paralelos de 12 mm de diámetro y 1,5 mm de separación hechos con el material de cobre de la placa epoxy (doble faz), la placa tiene una constante dieléctrica  $\xi_r$  de aproximadamente 4,7 por lo que se obtiene una

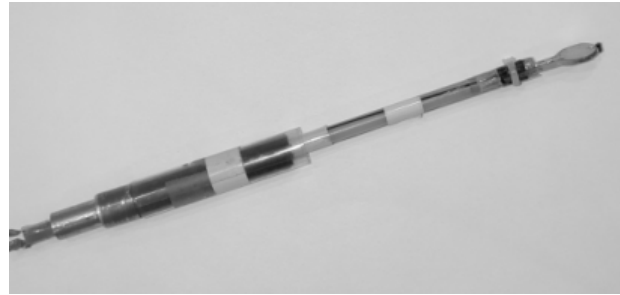


Fig. 5. Foto del sensor.

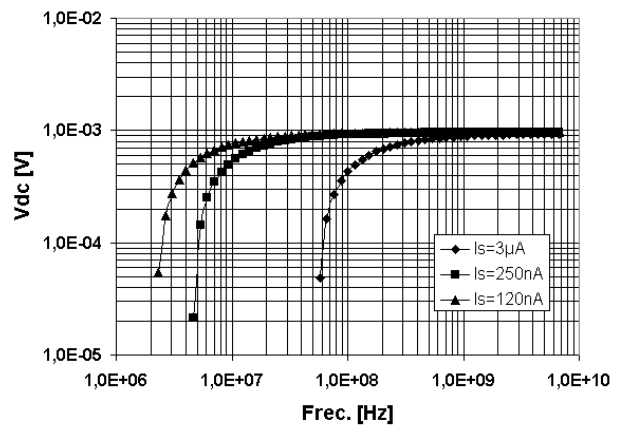


Fig.6. Respuesta en frecuencia del sensor a distintos valores de corriente de saturación  $I_s$  del diodo.

capacidad  $Ca$  de aproximadamente 3,2 pF, se eligió un diodo schottky que trabaje sin polarización tipo BAT62 como detector de RF, el cual tiene una capacidad de juntura  $Cd$  de 0,35 pF y una corriente de saturación  $I_s$  de 120 nA y se lo conectó entre las dos placas paralelas. Luego, en la proximidad del detector se realizó un filtro pasa bajos usando resistencias SMD y capacidad distribuida hechas con microcintas. Se implementó la línea de transmisión utilizando un material resistivo de 10KΩ/cm de 15 cm de longitud.

La Fig.6 muestra la respuesta en frecuencia del sensor, siguiendo las técnicas analíticas desarrolladas en [5], a distintos valores de la corriente de saturación  $I_s$  del diodo detector, para un campo eléctrico  $E_i$  de 35 V/m y una capacidad  $Ca$  de 3,2 pF. Se puede observar que a medida que la corriente  $I_s$  aumenta la frecuencia de corte inferior aumenta, disminuyendo el ancho de banda del sensor.

### 2.2.1 Ejemplo:

Analizaremos analíticamente la respuesta del sensor ante la presencia de un campo eléctrico de 35 V/m.

Según datos del fabricante del diodo BAT62 tenemos que:  $n=1,04$  y  $Cd=0,35$  pF y de acuerdo a la construcción del capacitor de placas paralelas  $\xi_r=4,7$ ,  $d=1,5$  mm y  $Ca=3,2$  pF.

Utilizando la expresión (2) se obtiene una tensión inducida:

$$Vi = 11,17 \text{ mV}$$

Si se trabaja a  $25^\circ\text{C}$  entonces según la expresión (4):

$$\alpha = 37,4 \text{ V}^{-1}$$

Por lo que se resuelve según la expresión (5) que la tensión continua detectada a la salida del diodo es:

$$Vdc = 947 \text{ } \mu\text{V}.$$

### 2.2.2 Simulación:

Se realizaron simulaciones del sensor usando un simulador PSPICE con los valores del ejemplo anterior a distintas frecuencias: 10 MHz, 100 MHz, 500 MHz y 1GHz. En la figura 7 se muestra el circuito de simulación, donde  $Ca$  representa la capacidad del capacitor que actúa como antena y  $Vi$  la tensión inducida en 10 MHz,  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$ ,  $R4$ ,  $C1$  y  $C2$  forman el filtro pasa bajos,  $R6$  y  $R7$  representa la resistencia total de la línea de transmisión y  $R5$  y  $C3$  representa la impedancia de entrada del voltímetro. La figura 8 muestra la respuesta de las simulaciones a distintas frecuencias. Se puede observar que los valores simulados se condicen con el resultado del análisis teórico. Se puede apreciar a partir de las simulaciones que a medida que la frecuencia se incrementa acercándose a 1GHz la tensión  $Vdc$  disminuye, esto es debido a que a frecuencias elevadas comienza a tener efecto en la respuesta del detector los parámetros del diodo como la capacidad de juntura  $Cd$ , la corriente de saturación  $Is$ , etc. En baja frecuencia, la frecuencia de corte inferior está influenciada por la capacidad  $Ca$  y la corriente  $Is$  del diodo. El nivel de campo eléctrico aplicado afecta también las frecuencias de corte del sensor, a medida que el nivel de campo aplicado disminuye, induciendo valores de  $Vi$  pequeños, el ancho de banda del sensor se reduce.

### 2.2.3 Pruebas experimentales:

Se ensayó el sensor desarrollado en una celda GTEM (Gigahertz transverse electromagnetic) para probar su respuesta (Fig. 9). El sensor se conectó a un voltímetro digital de continua para obtener el nivel de tensión continua de salida. Se aplicó un nivel de campo de 35V/m en 10 MHz, 100 MHz, 500 MHz y 1 GHz dentro de la

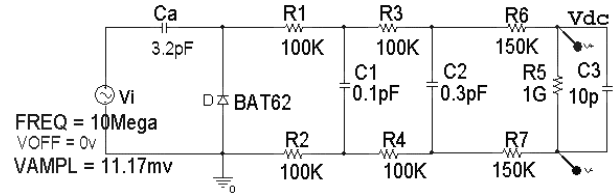


Fig. 7. Circuito de simulación

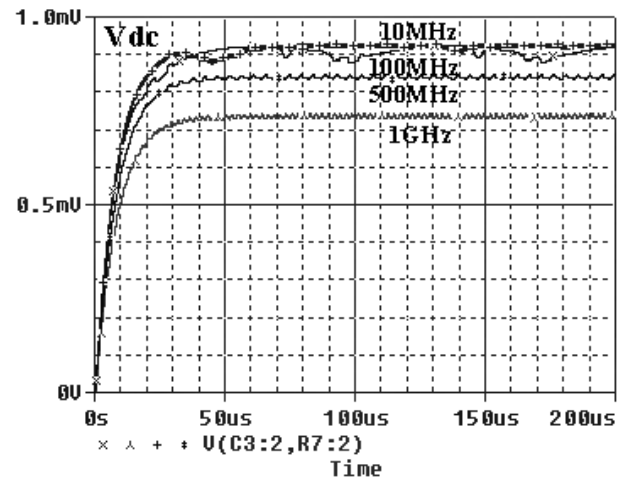


Fig. 8. Tensión de salida simulada a distintas frecuencias.



Fig. 9. Medición en una celda GTEM

celda GTEM con el sensor dispuesto en forma perpendicular a las líneas de campo eléctrico. Se observó que los resultados medidos concuerdan con el análisis teórico y simulado.

### 2.3. Correcciones de la tensión medida

Este sensor fue pensado para trabajar con un voltímetro digital portátil de reducido tamaño conectado en el extremo del sensor, que convierta la señal medida a digital y transmita la información digital por medio de fibra óptica, para no distorsionar el campo eléctrico, hacia una PC donde se corregirán los valores medidos por factores de efecto de temperatura, linealidad y respuesta en frecuencia. Todos estos factores se relevan cuando se calibra el sensor en la celda  $\mu$ TEM y se guardan en un archivo para su posterior uso.

### 3. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sensor de campo eléctrico miniatura de RF para poder ser calibrado con baja incertidumbre y trazabilidad a los patrones nacionales de manera de lograr una mejora en la medición de campo eléctrico.

Se realizó un análisis teórico y simulaciones del sensor a distintas frecuencias utilizando modelos SPICE. Se lo probó en una celda GTEM y se corroboró la concordancia de los resultados medidos con los teóricos y simulados.

La respuesta del sensor varía de acuerdo a la temperatura, al nivel de campo eléctrico aplicado y principalmente a los parámetros del diodo, de aquí la importancia de utilizar el diodo adecuado para este tipo de aplicación, que trabaje sin polarización (zero bias) con baja capacidad de juntura, baja corriente de saturación y baja inductancia serie.

Dado el reducido tamaño del sensor se lo puede utilizar para mediciones de campo eléctrico en alta frecuencia en forma puntual.

### 4. REFERENCIAS

- [1] M. Kanda, "Standard probes for electromagnetic field measurements," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. 41, p. 1349, Oct. 1993.
- [2] M.L. Crawford, "Generation of standard EM fields using TEM transmission cells," IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. EMC-16, p. 189, 1974.
- [3] M.L. Crawford et al., "Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements," IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. EMC-20, p. 368, 1978.
- [4] K. Münter, R. Pape, and J. Glimm, "Portable E-field strength meter and its traceable calibration up to 1 GHz using a  $\mu$ TEM cell," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 46, pp. 549-550, Apr. 1997.
- [5] M. Kanda, "Analytical and numerical techniques for analyzing a linear dipole with a nonlinear load," IEEE Trans. Antennas and Propagation, vol. AP-28, pp. 71-78, Jan. 1980.