

# Análisis y Comparación de Metodologías para Determinar Experimentalmente la Ganancia de Antenas de RF y Microondas

José L. Medina-Monroy, Edgar Díaz-Tapia, José L. Olvera-Cervantes  
 Ricardo A. Chávez- Pérez, Arturo Velázquez-Ventura

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
 km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, 22860, Baja California, México.  
 jmedina@cicese.mx

## RESUMEN

En este trabajo, se presentan diversas metodologías para determinar la ganancia de antenas planares. Se describen los métodos de medición que emplean dos antenas, tres antenas y el propuesto que utiliza cuatro antenas, permitiendo determinar la ganancia de cada antena y mejorar la exactitud. Se incluyen las ecuaciones desarrolladas y se efectúa una comparación de resultados, determinando los errores en la exactitud de las mediciones efectuadas con cada método. Se midieron cuatro antenas planares de microcinta mediante un sintetizador de señales, un analizador de espectro y un analizador de redes vectorial que opera en la banda de 0.045 a 50 GHz.

## 1. INTRODUCCIÓN

En general las antenas son elementos radiadores que se emplean en receptores y transmisores que operan a frecuencias de RF y microondas. Las antenas deben tener un buen comportamiento y satisfacer características importantes como: una ganancia, directividad, impedancia de entrada o vswr y un patrón de radiación con niveles de lóbulos laterales adecuados, dentro de un ancho de banda de interés [1]. La característica más importante que describe el comportamiento de un elemento radiador o antena es la ganancia. La ganancia de la antena juega un papel muy importante en el comportamiento de la señal emitida o recibida. Es necesario conocer la ganancia de las antenas con exactitud, para poder determinar el nivel recibido por un receptor o el nivel emitido por un transmisor. La ganancia de una antena depende del número de elementos que la forman y se asocia con su directividad. Una antena con ganancia alta será más directiva, permitiendo concentrar la energía en una dirección y disminuir el nivel de sus lóbulos laterales.

Existen varios métodos y configuraciones que se utilizan para medir la ganancia, y que dependen de la frecuencia de operación [2-4]. A frecuencias superiores a 1 GHz, usualmente se utiliza el espacio libre para medir ganancia, ya que a frecuencias menores es difícil simular las condiciones de espacio libre debido a las longitudes de onda grandes, razón por la cual se mide bajo condiciones con reflexión a tierra [2].

En este trabajo, se presentan metodologías disponibles para determinar la ganancia de antenas

planares. Se describen los métodos de medición basados en dos antenas, tres antenas y se propone un nuevo método en el cual se utilizan cuatro antenas, permitiendo determinar la ganancia de cada una de las antenas con exactitud. Se incluyen las ecuaciones desarrolladas y se efectúa una comparación de resultados, determinando los errores en la exactitud de las mediciones efectuadas con cada método.

## 2. MÉTODOS DE MEDICIÓN

La ganancia de las antenas se puede determinar mediante diferentes alternativas que emplean dos, tres o cuatro antenas, mostradas en la Fig. 1.

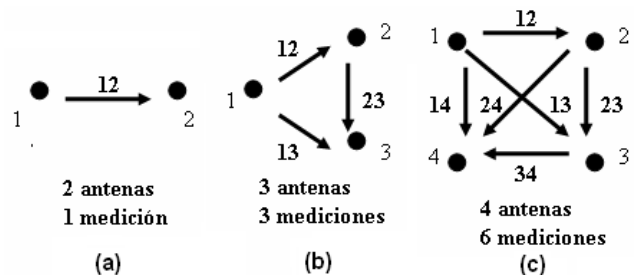


Fig. 1 Alternativas de medición de antenas.

Las mediciones se pueden efectuar mediante un generador de señales y un analizador de espectro como se muestra en la Fig. 2, o bien mediante un analizador de redes mostrado en la Fig. 3.

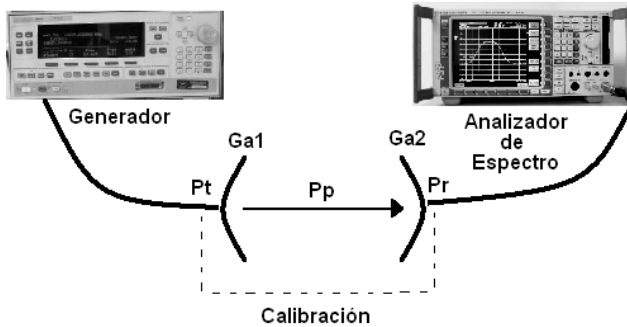


Fig. 2 Medición de dos antenas mediante un analizador de espectro.

**2.1. Método de Dos Antenas**

Existen dos variantes basados en la medición de dos antenas, que pueden emplearse para determinar la ganancia de las mismas: el de ganancia absoluta y el de ganancia de referencia. El de ganancia absoluta se utiliza para calibrar antenas que pueden utilizarse como ‘patrón’ en mediciones de ganancia, de tal manera que se evita el conocimiento previo de la ganancia de las antenas. En este método se utilizan dos antenas ‘idénticas’ y se supone que las dos antenas tienen la misma ganancia, lo cual representa una desventaja. Por otro lado, el método de ganancia de referencia se emplea una antena conocida ‘patrón’ para determinar la ganancia de la antena bajo prueba [2].

Para la medición de ganancia mediante este método, se considera la Fig. 2, en donde el generador de señales envía una portadora de RF a la frecuencia de medición con una potencia  $P_t$  de valor fijo, la cual se establece siguiendo la trayectoria de calibración que conecta al generador con un analizador de espectro. Una vez calibrado, se conectan las antenas y se realiza la medición de la potencia recibida  $P_r$ . Para ello, las antenas deberán estar separadas una distancia mayor a la requerida para operar en el campo lejano  $Ff$  (Far field) con el fin de reducir los efectos de proximidad y multitrayectorias [2], la cual se obtiene de:

$$Ff = \frac{2(D_{max})^2}{\lambda} \quad [mts], \quad (1)$$

donde  $D_{max}$  es la dimensión mayor de la antena y  $\lambda$  la longitud de onda  $\lambda = c/f$  en metros.

La relación de la potencia recibida  $P_r$  a la transmitida  $P_t$  se determina con la ecuación de transmisión de Friis como [5]:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{Ga1 \cdot Ga2 \cdot \lambda^2}{(4\pi Dist)^2}, \quad (2)$$

donde  $Ga1$  representa a la ganancia de la antena que actúa como transmisora,  $Ga2$  a la ganancia de la antena receptora y  $Dist$  es la distancia entre las dos antenas la cual debe ser mayor a  $Ff$  calculado con la Ec. (1). La potencia recibida se puede expresar en dBm como [5]:

$$P_r = P_t + Ga1 + P_p + Ga2 \quad [dBm], \quad (3)$$

donde  $P_p$  son las pérdidas por propagación [5]:

$$P_p = 20 \log \left[ \frac{\lambda}{4\pi Dist} \right] \quad [dB]. \quad (4)$$

Suponiendo que  $Ga1 = Ga2 = G_{ant}$  en la Ec. (3), la ganancia de la antena se determina como:

$$G_{ant} = \frac{P_r - P_t - P_p}{2} \quad [dB]. \quad (5)$$

Una desventaja de utilizar el analizador de espectro es que es más laborioso efectuar mediciones en anchos de banda grandes. Un método alternativo consiste en utilizar un analizador de redes como el que se muestra en la Fig. 3, el cual permite medir en un ancho de banda grande y simultáneamente determinar la impedancia de las antenas.

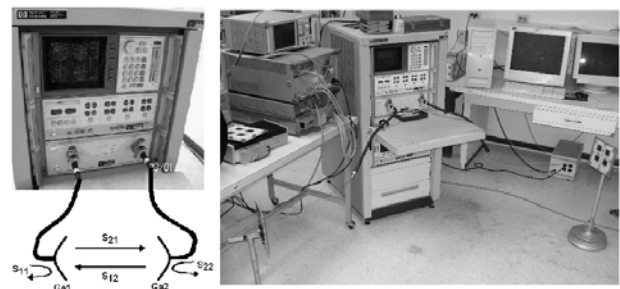


Fig. 3. Medición de antenas mediante un analizador de redes.

Mediante este equipo se determina la ganancia de la antena utilizando dos o más antenas. Se conectan dos cables semirígidos o conformables largos en los puertos del analizador de redes y se efectúa una calibración SOLT (Short-Open-Load-Thru) de dos puertos. Una vez calibrado, se colocan las antenas a una distancia fija ( $Dist > Ff$ ). Enseguida

se procede a medir el coeficiente de transmisión  $S_{21}$  el cual es equivalente a:

$$S_{21} = \sqrt{\frac{Pr}{Pt}} \quad (6)$$

y se calcula la ganancia mediante:

$$Gant = \frac{20 \log(S_{21}) - Pp}{2} \quad (7)$$

Al emplear el método de dos antenas se tiene la desventaja de que se supone que la ganancia de las dos antenas es igual.

### 2.2. Método de Tres Antenas

Al utilizar tres antenas se deben realizar tres mediciones tal como se indica en la Fig. 1b. La primera medición se realiza entre la antena 1 y la antena 2 (*Med12*), la segunda entre la antena 1 y la 3 (*Med13*) y la tercera medición entre la antena 2 y la 3 (*Med23*). Al tener tres mediciones (*Med12*, *Med13* y *Med23*) y tres incógnitas ( $Gant_1$ ,  $Gant_2$  y  $Gant_3$ ), se plantea un sistema de tres ecuaciones simultáneas. Estas ecuaciones que se pueden resolver empleando matrices:

$$\begin{bmatrix} Gant_1 \\ Gant_2 \\ Gant_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0.5 & -0.5 & 0.5 \\ -0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Med12 \\ Med13 \\ Med23 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

cuya solución es:

$$Gant_1 = \frac{Med12 + Med13 - Med23}{2}, \quad (9)$$

$$Gant_2 = \frac{Med12 - Med13 + Med23}{2}, \quad (10)$$

$$Gant_3 = \frac{-Med12 + Med13 + Med23}{2}, \quad (11)$$

donde  $Med_{ij} = 20 \log(S_{21,ij}) - Pp$  para  $i=1,2$  y  $j=2,3$ . Mediante este método se tiene la ventaja de que permite determinar la ganancia correspondiente a cada una de las antenas y simultáneamente su impedancia de entrada, sobre un gran ancho de banda cuando se utiliza un analizador de redes.

### 2.3. Método de Cuatro Antenas

Con el fin de mejorar la exactitud, se propone utilizar cuatro antenas y efectuar 6 mediciones como se muestra en la Fig. 1c. En este método, se forma una matriz de 4 X 4 de la forma dada en la Ec. (12), en donde los elementos de la diagonal son ceros y la matriz es recíproca, es decir que ( $M_{12}=M_{21}$ ,  $M_{13}=M_{31}$ ,  $M_{14}=M_{41}$ ,  $M_{23}=M_{32}$ ,  $M_{24}=M_{42}$  y  $M_{34}=M_{43}$ ), de tal manera que solamente se requiere efectuar 6 mediciones ( $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{14}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{24}$  y  $M_{34}$ ):

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & 0 & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & 0 & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Considerando 6 mediciones se mejora la exactitud, ya que se tienen más mediciones que incógnitas, resultando un sistema sobredeterminado:

$$\begin{bmatrix} Gant_1 \\ Gant_2 \\ Gant_3 \\ Gant_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Med12 \\ Med13 \\ Med14 \\ Med23 \\ Med24 \\ Med34 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

donde el signo (-) en la Ec. (13), indica la pseudoinversa izquierda de la matriz, y entonces el sistema se resuelve por medio del método de mínimos cuadrados para minimizar el error, el cual se da por la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores medidos y los calculados.

Otra manera es resolver un conjunto de cuatro mediciones con cuatro incógnitas, en donde el número de combinaciones posibles se puede obtener de:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}, \quad (14)$$

donde n es el número total de mediciones y k el número de mediciones consideradas simultáneas o en grupo, que para nuestro caso, de un total de 6 mediciones ( $n=6$ ) y para grupos de 4 ( $k=4$ ) se tiene un total de 15 combinaciones.

Las combinaciones (12, 13, 24 y 34), (12, 14, 23 y 34) y (13, 14, 23 y 24) proporcionan matrices singulares, y por lo tanto no tienen solución. Otras combinaciones son equivalentes y producen el mismo resultado. Por lo tanto, eliminando las combinaciones con repeticiones, se puede resumir a 6 combinaciones posibles en grupos de 4, que presentan resultados diferentes.

En todos los métodos, se supone que el generador de RF tiene una alta estabilidad y el equipo de medición está bien calibrado. Además, que las antenas están suficientemente alejadas una de la otra, que están bien alineadas, bien acopladas y que las reflexiones y multitrayectorias son mínimas. Con el fin de evitar reflexiones y mejorar la exactitud de la medición, las antenas se pueden introducir dentro de una cámara anecoica.

**3. RESULTADOS**

Con el propósito de evaluar los diferentes métodos, se efectúan mediciones a las cuatro antenas planares que se muestran en la Fig. 4. Todas las antenas se diseñaron a la frecuencia de 2.45 GHz, se construyeron en un sustrato FR4 suspendido en aire y se midieron en la banda de 2.0 a 3.0 GHz. Las antenas de la Fig. 4 (Ant 1) y (Ant 2) son de cuatro elementos, mientras que la (Ant 3) y la (Ant 4) son de un solo elemento.

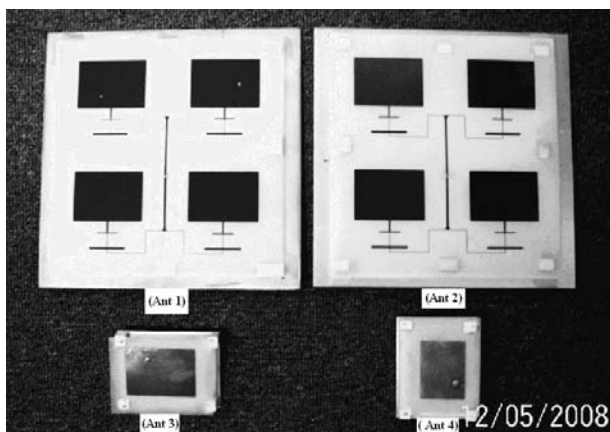


Fig. 4. Antenas planares de uno y cuatro elementos.

La primera medición se realizó aplicando el método de las dos antenas dado en la sección 2.1. Para ello, se utiliza un sintetizador de señales de alta estabilidad que cubre el intervalo de frecuencias de 10 MHz a 20 GHz y un analizador de espectro que opera en la banda de 9 KHz a 40 GHz mostrados en

la Fig. 2. El equipo se calibró en frecuencias discretas de 2.2 a 2.6 GHz en pasos de 50 MHz y enseguida se colocaron las antenas dadas en la Fig. 4(1) y 4(2) a una distancia de 2 metros una de la otra. Los resultados de la ganancia de las antenas, donde se supone que  $G_{a1}=G_{a2}$ , se muestran en la Fig. 5 utilizando el analizador de espectro. Además se incluyen los resultados obtenidos utilizando un analizador de redes vectorial que opera de 0.045 a 50 GHz, y calibrado en la banda de 2 a 3 GHz. Se puede observar una diferencia en las ganancias de  $\pm 0.7dB$  entre los dos equipos.

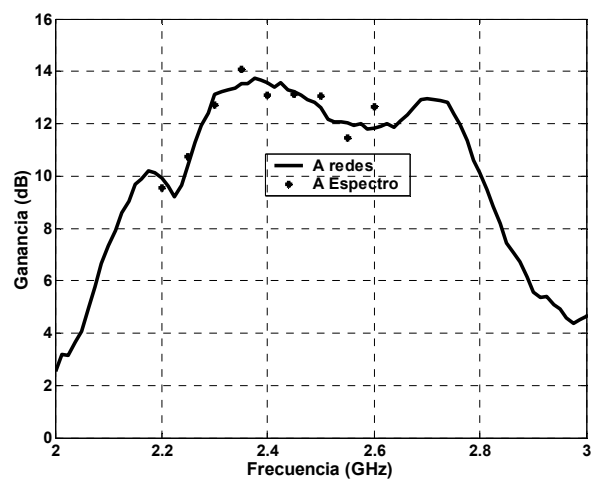


Fig. 5. Medición de la ganancia utilizando 2 antenas.

La siguiente medición se efectúa utilizando tres antenas mostradas en la Fig 4 (Ant 1), (Ant 2) y (Ant 3), empleando el analizador de redes y la metodología dada en la sección 2.2. En la Fig. 6 se proporcionan las respuestas de la ganancia correspondiente a cada una de las antenas y se comparan con la ganancia calculada mediante el método de las dos antenas. Se puede observar que existe una diferencia máxima de 0.8 dB entre las ganancias de las antenas de la Fig. 4 (Ant1) y (Ant2) dentro de la banda de 2.2 a 2.8 GHz, sin embargo, a la frecuencia de 2 GHz se tiene una diferencia de 6 dB. Además, debido a que el método de dos antenas supone que las ganancias de las dos antenas son iguales, la respuesta denominada 2ant dada con la línea punteada, pasa por el centro de las dos respuestas. En este caso, la diferencia en las respuestas no es significativa porque las dos antenas (Ant1=Ant2) son similares y proporcionan una ganancia de  $13 \pm 1dB$  dentro de la banda de operación. Por otro lado, la ganancia de la Ant3, dada en la Fig 4, resultó de  $8 \pm 1dB$ .

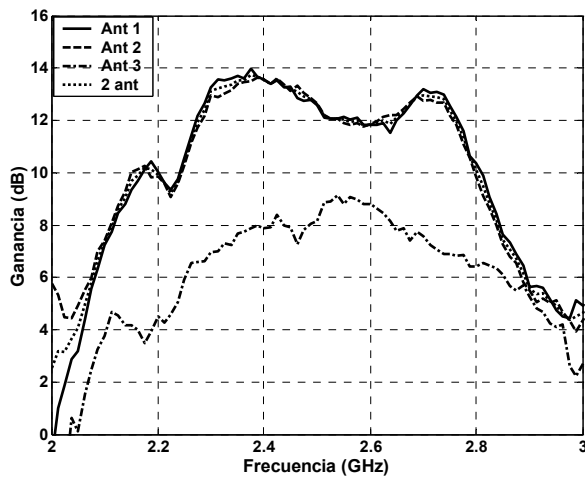


Fig. 6. Medición utilizando el método de 3 antenas.

En la Fig. 7, se muestra el error relativo existente entre las ganancias de las antenas 1 y 2, calculada con el método de tres antenas, con respecto a la ganancia obtenida con el método de las dos antenas. Se puede apreciar que dentro de la banda de operación de 2.2 a 2.8 GHz, el error es menor al  $\pm 3\%$ , sin embargo en los límites de la banda aumenta significativamente (hasta un 500 % a 2 GHz).

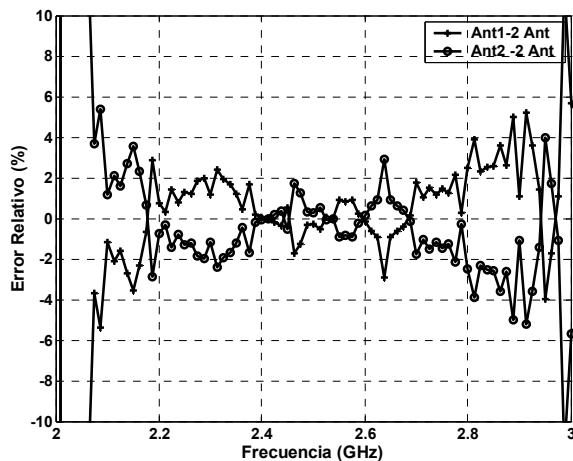


Fig. 7. Error relativo de las ganancias del método de tres antenas con respecto al de dos antenas.

Aplicando el método propuesto de cuatro antenas mencionado en la sección 2.3 a las cuatro antenas mostradas en la Fig. 4, se efectuaron 6 mediciones: Med12, Med13, Med14, Med23, Med24 y Med34 y se aplicó la Ec. (13), la cual se resolvió por el método de mínimos cuadrados para encontrar las

ganancias correspondientes a cada una de las cuatro antenas. Los resultados para la antena 1 empleando cuatro antenas y 6 mediciones (4A-6M) se muestran en la Fig. 8, y se comparan con el método de dos antenas con una medición (2A-1M), de tres antenas con tres mediciones (3A-3M) y el de cuatro antenas con cuatro mediciones (4A-4M). Se puede notar una diferencia de hasta 1 dB con respecto a los demás métodos, que provoca un error relativo máximo de  $\pm 8\%$  dentro de la banda de operación e incrementando fuera de ella.

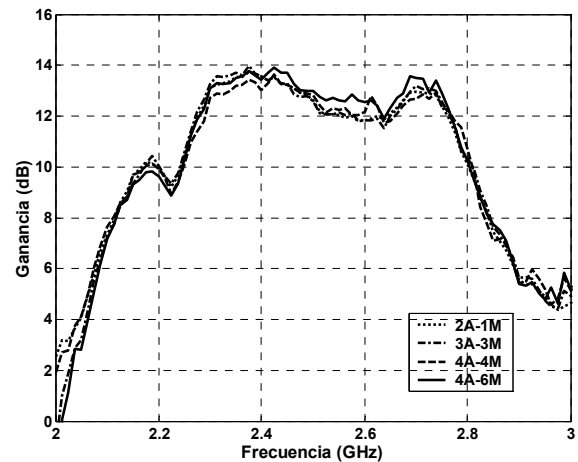


Fig. 8. Comparación de la ganancia de la antena 1 obtenida con los diferentes métodos.

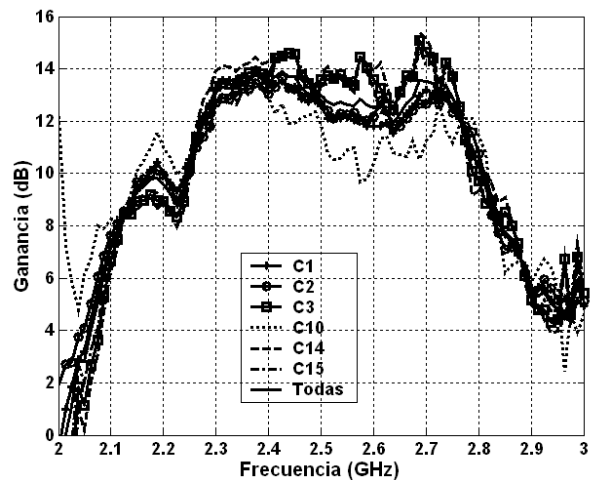


Fig. 9. Ganancia calculada con las combinaciones en grupos de cuatro mediciones.

Resolviendo las seis combinaciones en grupos de cuatro mediciones, de un total de 15 combinaciones, se obtuvo la ganancia de la antena 1 y se graficó en la Fig. 9, donde se incluye la ganancia que

considera las 6 combinaciones. Se puede notar una diferencia de hasta 4 dB entre las combinaciones (C10 y C14), y que además la medición que considera todas las mediciones, corrige los errores al encontrarse en el centro de todas.

En la Fig. 10 se muestran las ganancias correspondientes a cada una de las cuatro antenas caracterizadas empleando cuatro antenas y seis mediciones, donde se puede observar el gran parecido de las antenas denominadas Ant1 y Ant2 con una ganancia cercana a 14 dB y las antenas Ant3 y Ant4 con ganancias entre 7 y 9 dB. Se incluyen los coeficientes de reflexión S11 en dB o pérdidas por regreso correspondiente a cada una de las antenas.

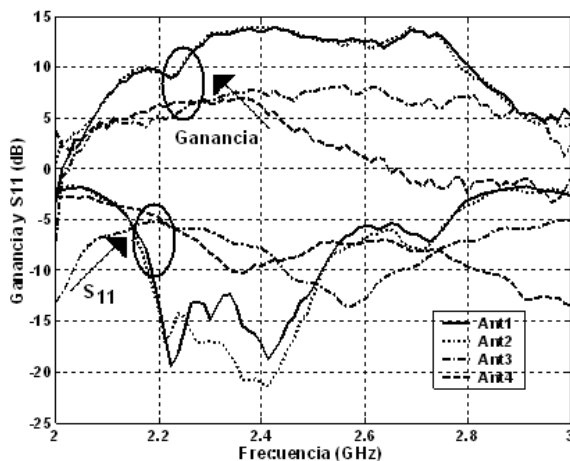


Fig. 10. Ganancia y S11 de las cuatro antenas obtenidas mediante el método de las 4 antenas.

Se puede observar en la Fig. 10, que el S11 se deteriora en los extremos de la banda causando reflexiones. Estas reflexiones provocan que el error entre los diferentes métodos aumente a frecuencias cercanas a 2 GHz (Err=-100%) y a 3 GHz (Err=22%). Es importante resaltar que en el método propuesto de las cuatro antenas, se mide tres veces cada antena con diferentes combinaciones (la 1 con 2,3 y 4), (la 2 con 1,3 y 4), (la 3 con 1,2 y 4) y (la 4 con 1,2 y 3). Debido al gran número de mediciones,

el error en la medición de la ganancia debido al desacoplamiento de las antenas, es menor que en los otros dos métodos.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentaron los métodos que se utilizan para determinar la ganancia de antenas planares. Se mencionaron los métodos de medición basados en dos y tres antenas, y se propuso un tercer método basado en cuatro antenas y seis mediciones, el cual permite determinar la ganancia de cada antena y mejorar la exactitud disminuyendo los errores de reflexión y desacoplamientos. Además, se midieron cuatro antenas planares de microcinta dentro de la banda de 2 a 3 GHz, y se compararon los resultados con los obtenidos con los métodos de 2 y 3 antenas, calculando la diferencia y el error relativo de dichos métodos con respecto al método propuesto. Se mostraron errores entre el 3 % y 8 % dentro de la banda de operación, y mayor al 20 % en los extremos de la banda donde la impedancia de las antenas se degrada.

#### REFERENCIAS

- [1] A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Olver, P. Knight, *The Handbook of Antenna Design*, London, Peter Peregrinus Ltd., 1986.
- [2] Balanis Constantine A., *Antenna theory analysis and design*, John Wiley and Sons, Inc., Segunda edición, Nueva York, 1997.
- [3] W.H. Kummer and E.S. Gillespie, *Antenna measurements – 1978*, Proc. IEEE, Vol 66, No 4, pp 483-507, April 1978.
- [4] A.C. Newell, R.C. Baird and P.F. Wacker, *Accurate measurement of antenna gain and polarization at reduced distances by an extrapolation technique*, IEEE trans. Antennas Propagat., Vol AP-21, No 4, pp. 418-431, July 1973.
- [5] A. Cardama A., L. Jofre R., J.M. Rius C., J. Romeu R., S. Blanch B, M. Ferrando B., *Antenas*, Ediciones UPC, segunda edición, 460 pp., septiembre 2002.