

# ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES EN MEDIDA DE ANTENAS

Silvia Urosa<sup>(1)</sup>, Lara Orgaz<sup>(1)</sup>, Sara Burgos<sup>(1)</sup>, Manuel Sierra-Castañer<sup>(1)</sup>, José Luis Besada<sup>(1)</sup>.

[silvia@gr.ssr.upm.es](mailto:silvia@gr.ssr.upm.es), [lara@gr.ssr.upm.es](mailto:lara@gr.ssr.upm.es), [sarab@gr.ssr.upm.es](mailto:sarab@gr.ssr.upm.es), [m.sierra.castaner@gr.ssr.upm.es](mailto:m.sierra.castaner@gr.ssr.upm.es), [besada@gr.ssr.upm.es](mailto:besada@gr.ssr.upm.es).

<sup>(1)</sup> Grupo de Radiación, Dpto. de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones.  
Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria. 28040. Madrid.

**Abstract**—The exact measurement of a quantity is a theoretical concept which cannot be obtained in practical measurements. In every measurement a difference exists between the true value and the measured value. Uncertainty is that part of the expression of the result of a measurement which states the range of values within which the true value is estimated to lie. This paper details the characteristics of a simulator based on spherical near-field measurement to evaluate the effect of the uncertainties in the antenna parameter – i.e. far-field radiation pattern, directivity, beamwidth, side lobe levels –.

## I. INTRODUCCIÓN

La medida exacta de una cantidad es un concepto teórico, que no se puede obtener en la práctica. En toda medida, existe una diferencia entre el valor real y el valor medido. La incertidumbre es esa parte de la expresión del resultado que establece el rango de valores entre los que se estiman que esté el valor real.

La incertidumbre global de una medida, expresa que el valor medido es sólo uno de los posibles valores distribuidos, de forma dispersa, alrededor del valor medido. El método empleado para estimar los límites de la incertidumbre, y para proporcionar el nivel de confianza asociado, está basado en el análisis estadístico, y depende de la magnitud y la distribución de las incertidumbres individuales de las componentes.

Para evaluar el efecto de las incertidumbres en los parámetros de antena, existen fundamentalmente tres procedimientos:

- 1.- **Análisis analítico**: las fuentes de incertidumbre que normalmente se suelen analizar de forma analítica son el ruido y los errores de truncamiento en las medidas de campo cercano en el sistema plano
- 2.- **A partir de simulaciones**: este estudio resulta interesante en los diseños de sistema de medida donde se necesitan conocer a priori los efectos de posibles desviaciones en los parámetros de antena. De esta forma, por ejemplo, a partir de la modificación de adquisiciones virtuales y su posterior transformación a campo lejano se puede analizar la influencia de dichos cambios en los resultados finales.
- 3.- **A través de medidas**: este tipo de análisis se utiliza cuando se pueden estimar el efecto de las incertidumbres en los parámetros de antena a posteriori, es decir una vez realizadas las medidas. Así, mediante la comparación de medidas con configuraciones concretas (por ejemplo con

barridos en  $\theta$  o en  $\varphi$ , medidas con o sin atenuador...) se pueden extraer las incertidumbres asociadas a la medida.

Cabe destacar que en las medidas en campo lejano, las incertidumbres se transfieren directamente, por lo que es posible evaluar dichas incertidumbres analíticamente o mediante medidas. Sin embargo, cuando se trata de medidas obtenidas a partir de una transformación de campo cercano a campo lejano, se han de evaluar las incertidumbres vía simulación ya que el método analítico resulta bastante complicado.

El objetivo de este artículo es realizar un estudio de los errores producidos en el proceso de medida y que son susceptibles de afectar a los resultados finales. Para ello se ha implementado un simulador basado en medidas en campo próximo esférico que permite analizar los errores debidos a incertidumbres en los sistemas de medida en campo próximo, analizando las desviaciones producidas una vez realizada la transformación de campo próximo a campo lejano [1] – [4]. Por lo tanto, este artículo se divide en los siguientes apartados: en el segundo apartado se van a presentar las principales características de los análisis de incertidumbres. En el tercer apartado, se detallará el simulador basado en medidas realizado y su integración en el software de medidas se comentará en el cuarto apartado. En el quinto apartado, se mostrarán algunos de los resultados obtenidos y por último, en el sexto apartado, se mencionarán las conclusiones extraídas de este estudio.

## II. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES

El método para caracterizar la incertidumbre de una medida está basado en el análisis estadístico y depende de la magnitud y la distribución de las incertidumbres individuales de las componentes. Cada componente individual de la incertidumbre, que contribuye a la incertidumbre global de la medida, está representada por la estimación de la desviación estándar. Las incertidumbres pueden clasificarse en dos categorías [5], [6]: tipo A o tipo B. Las incertidumbres de tipo A, se pueden estimar mediante métodos estadísticos aplicados a medidas repetidas, mientras que las de tipo B, se pueden estimar mediante información disponible o basándose en la experiencia.

La diferencia entre la clasificación tipo A y tipo B no radica en la naturaleza de los componentes, sino que es simplemente una división basada en sus medios de evaluación. Ambos tipos poseen distribuciones de probabilidad y las componentes de la incertidumbre

resultantes de cada tipo están cuantificadas por una desviación estándar.

#### A. Método de evaluación de incertidumbres Tipo A

El tipo A es el método de evaluación de incertidumbre mediante análisis estadístico de una serie de observaciones. En este caso, la incertidumbre estándar es la desviación estándar experimental de la media que se deriva de un promedio o un análisis de regresión apropiado. Las variaciones en estas medidas repetidas se asumen que son debidas a la influencia de cantidades aleatorias que afectan al resultado de la medida. Por lo tanto ningún resultado es necesariamente correcto.

En la práctica, medidas repetidas de la misma medida, pueden ayudar a evaluar las incertidumbres tipo A. Tratando los resultados estadísticamente, se pueden obtener los valores de la media (la mejor aproximación al “valor real”) y de la desviación estándar. La desviación estándar se puede incorporar como una incertidumbre estándar dentro de los cálculos de incertidumbre estándar combinada.

Como resultado del análisis estadístico, la desviación estándar experimental es la siguiente:

$$u_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (1)$$

#### B. Método de evaluación de incertidumbres Tipo B

El tipo B, es el método de evaluar la incertidumbre mediante otros medios distintos al análisis estadístico de una serie de observaciones. En este caso, la evaluación de la incertidumbre estándar se basa en un conocimiento científico derivado de:

- Datos de medidas anteriores,
- Experiencia con conocimientos generales del comportamiento y propiedades de los materiales relevantes,
- Especificaciones del fabricante,
- Datos proporcionados en la calibración y otros certificados,
- Incertidumbres asignadas a los datos de referencia tomados de los manuales.

Si únicamente, se pueden estimar los límites superiores ( $a_+$ ) e inferiores ( $a_-$ ) para el valor de la cantidad que se medirá,  $X_i$ , se tiene que asumir una distribución de probabilidad con densidad de probabilidad constante entre estos límites (distribución de probabilidad rectangular) para asumir la posible variedad de la cantidad  $X_i$ . La desviación estándar  $u_x$ , dependiendo de la ley de distribución que se adopte, es la siguiente:

$$\text{Ley rectangular: } u_x = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\text{Ley triangular: } u_x = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (3)$$

$$\text{Ley normal: } u_x = \frac{a}{k} \quad (4)$$

donde  $k$  es el factor de cobertura.

$$\text{U-shaped (asimétrica): } u_x = \frac{a}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

$$\text{donde } a = \frac{(a_+ - a_-)}{2}.$$

La incertidumbre estándar combinada ( $U_c$ ) de una medida puede calcularse combinando las desviaciones estándar de todas las contribuciones individuales mediante una suma cuadrática (Root Sum of the Squares, RSS) asumiendo que todas las contribuciones son independientes [7].

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^m c_i^2 \cdot u_i^2} \quad (6)$$

La incertidumbre expandida ( $u_p$ ) se puede hallar multiplicando  $u_c$  por el factor de cobertura ( $k_p$ ), que es una constante que especifica el nivel de confianza ( $p\%$ ). Esto es válido considerando que la incertidumbre combinada de una medida tiene una distribución normal con una desviación estándar asociada.

### III. EVALUACIÓN DEL PARÁMETRO DE INCERTIDUMBRE MEDIANTE UN SIMULADOR BASADO EN MEDIDAS

Para evaluar el efecto de las incertidumbres en campo cercano en los parámetros de antena, se ha implementado un simulador basado en medidas. A través de medidas se puede evaluar la incertidumbre relacionada con los parámetros de la antena. Una manera es realizar medidas específicas que permitan caracterizar las inexactitudes. Así, se pueden estimar, por medio de los datos medidos, los parámetros que describen la inexactitud – por ejemplo, media, varianza y distribución de probabilidad –. La Fig. 1 representa los procesos que se tienen que aplicar para lograr la estimación de la incertidumbre en los resultados finales.

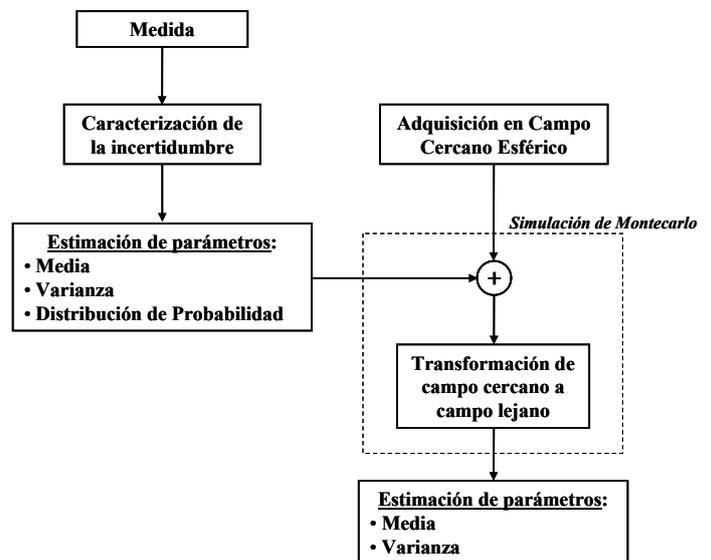


Fig. 1. Procedimiento de simulación empleando medidas

Tal y como se observa en la Fig. 1, este estudio de incertidumbres se divide en dos grandes etapas:

- En primer lugar se realizan medidas específicas, es decir, medidas en las que se pretende evaluar efectos como la variación térmica, reflexiones, cambio en la fase debido a las juntas rotatorias o a los cables etc. De dichas medidas se extraen parámetros estadísticos – tales como la media, la desviación estándar o la distribución de probabilidad – que sirven para caracterizar el error y la incertidumbre.
- En una segunda etapa, se introducen dichos parámetros en una adquisición esférica en campo cercano y mediante la

transformación de campo próximo a campo lejano y una simulación de Montecarlo, se puede estimar cómo afectan dichas desviaciones a los parámetros de antena. Nótese, que la evaluación se ha basado en datos medidos, en lugar de en modificaciones de adquisiciones virtuales.

Con tal esquema de simulación es posible evaluar la incertidumbre asociada a diferentes fuentes de error de manera experimental y observar su efecto en los resultados finales. De esta manera, las simulaciones basadas en datos reales proporcionarán un punto de vista más práctico del análisis de incertidumbres.

Además, nótese que mientras que es relativamente más fácil estimar las incertidumbres en medidas en campo lejano, es más difícil en adquisiciones en campo cercano ya que el proceso de transformación posterior normalmente modifica las desviaciones en errores más pequeños (con efecto de carga). Por lo tanto, se debe tener especial cuidado con las medidas específicas que se realizan para estimar las incertidumbres relacionadas con estas medidas.

Los errores e incertidumbres que se quieren analizar son: la variación térmica, la diafonía, el efecto causado a las juntas rotatorias, la incertidumbre producida por la corrección por desadaptación de impedancias y el ruido.

- **Variación térmica:** Para caracterizar el efecto de la variación térmica, se miden las variaciones de amplitud y fase, durante un periodo de tiempo considerable, con la antena apuntando al máximo. Luego, se adquiere el máximo y el mínimo y se calcula la media. En este caso, la distribución se aproxima a una gaussiana y  $3\sigma$  es la diferencia entre el máximo y la media.
- **Diafonía:** el umbral de la diafonía se puede medir conectando una carga en lugar de la antena bajo prueba. A continuación, se calcula el valor del pico mediante la adquisición del nivel del máximo y del mínimo y la media se calcula como: (máximo - mínimo) / 2. En este caso, la distribución de probabilidad también se aproxima a una gaussiana y  $3\sigma$  corresponde a la diferencia entre el máximo y la media.
- **Juntas rotatorias:** Para determinar la incertidumbre relacionada con las juntas rotatorias, se desconectan las antenas, se gira el posicionador y se adquiere durante los giros. Después, se estima la desviación estándar y se obtiene la distribución de probabilidad a partir de los datos obtenidos. En este caso, normalmente la distribución de probabilidad se acerca a una uniforme.
- **Corrección por desadaptación de impedancias:** las incertidumbres de los factores de corrección por desadaptación de impedancias están relacionadas con las reflexiones de los objetos de prueba o de los receptores. Estas reflexiones se pueden medir usando un analizador de redes y la incertidumbre asociada a esta magnitud depende de los coeficientes de reflexión.
- **Margen dinámico:** Este error esta relacionado con el ruido. Por lo tanto, en este caso se mide el umbral de ruido. En las Fig. 2 y Fig. 3 se ha esquematizado la manera de estimar el valor del pico de este error:

$$\sigma_{\text{ampl-DR}} = \frac{20 \log \left( 1 + 10^{\frac{-S/N}{20}} \right) - 20 \log \left( 1 - 10^{\frac{-S/N}{20}} \right)}{2} \quad (7)$$

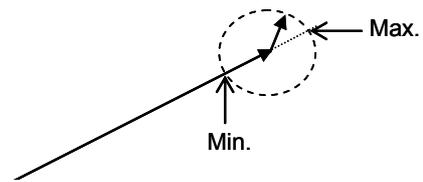


Fig. 2. Esquema del cálculo de la amplitud del ruido

$$\sigma_{\text{phase-DR}} = \arctan \frac{1}{S/N} \quad (8)$$

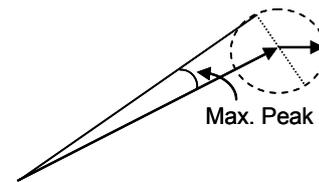


Fig. 3. Esquema del cálculo de la fase del ruido

Para ilustrar el orden de magnitud del ruido (en módulo y fase) en función de la relación señal a ruido (S/N), se han incluido en la Tabla 1 los errores calculados para algunos valores de S/N y su repercusión en el campo adquirido.

S/N (dB)	Ampl. Error (dB) Max. Point	Ampl. Error (dB) Min. Point	Phase error (deg)
10	2.39	-3.30	17.55
20	0.83	-0.92	5.71
30	0.27	-0.28	1.81
40	0.09	-0.09	0.57
50	0.03	-0.03	0.18
60	0.01	-0.01	0.06
70	0.00	0.00	0.02
80	0.00	0.00	0.01

Tabla 1: Errores para algunos valores de S/N

De nuevo en este caso, la distribución de probabilidad es una normal y  $3\sigma$  es el valor que se ha mostrado en la tabla anterior

Una vez que estos procedimientos se llevan a cabo, se puede extraer la información estadística, requerida como entrada en la simulación de Montecarlo mostrada en la Fig. 1. A continuación, el procesamiento de los resultados obtenidos a partir de la transformación de campo cercano a campo lejano permite determinar la incertidumbre total de los parámetros de la antena.

#### IV. INTEGRACIÓN EN EL SOFTWARE DE MEDIDA

Este estudio se ha integrado dentro del software PROCENCA para medida automatizada de antenas en cámara anecoica, diseñado por el Grupo de Radiación de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

PROCENCA es un entorno de programación basado en Visual Basic 6.0® funcionando sobre Windows. Esta herramienta permite definir los parámetros necesarios para la realización de cualquier tipo de adquisición de datos sobre una antena bajo prueba, además de su posterior procesado y representación de resultados.

Para el caso concreto de la simulación de incertidumbres, se ha diseñado un entorno amigable y de fácil manejo para el usuario, mostrado en la Fig. 4. Esta herramienta permite evaluar de manera flexible el efecto de distintos tipos de incertidumbres (por separado o todas juntas) en los resultados finales.

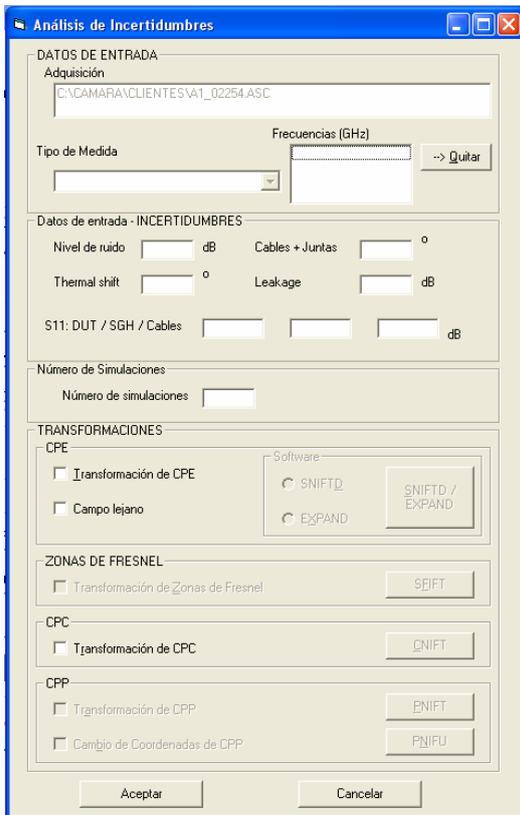


Fig. 4. Ventana principal de PROCENCA

Para ello, en primer lugar, se han de definir los siguientes parámetros de entrada: el nivel de ruido en decibelios, la desviación en grados producida por los cables, la junta rotatorio o la variación térmica, el error causado por la diafonía y por los coeficientes de reflexión, ambos en decibelios. Además, se han de fijar el número de iteraciones del simulador de Montecarlo y si se trata de una medida en campo lejano o en campo cercano, en cuyo caso es necesaria una transformación de campo próximo a campo lejano. A continuación, el entorno de programación PROCENCA permite llevar a cabo la transformación a campo lejano de las adquisiciones con error y representar los resultados por pantalla (diagramas de radiación, directividad...).

## V. RESULTADOS

El primer caso de evaluación de incertidumbre evaluado mediante esta herramienta ha sido considerar un ruido blanco gaussiano en una adquisición esférica en campo cercano. La Fig. 5 muestra el campo cercano adquirido con y sin error para un nivel de ruido fijado por el usuario..

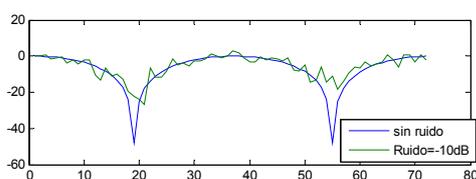


Fig. 5. Resultados obtenidos de las simulaciones en campo cercano

Esta herramienta también permite evaluar el ruido una vez realizada la transformación. La siguiente figura muestra las componentes copolar y contrapolar de los diagramas de radiación con y sin ruido blanco gaussiano en campo lejano. El resto de resultados se expondrán en la exposición durante el congreso.

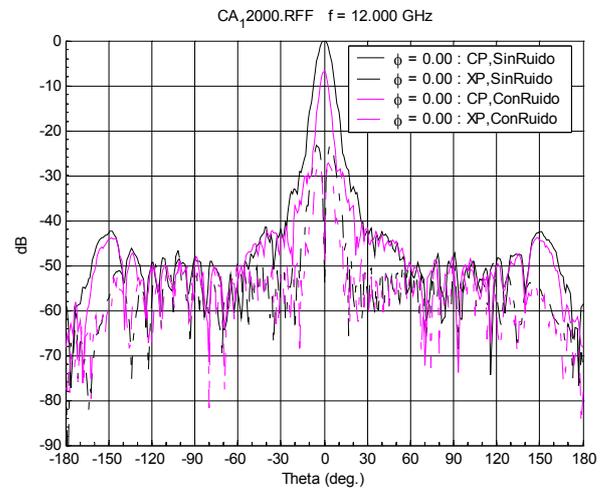


Fig. 6. Resultados obtenidos de las simulaciones en campo lejano

## VI. CONCLUSIONES

La herramienta presentada en este artículo permite llevar a cabo la evaluación de incertidumbres a partir de un simulador basado en medidas. El hecho de que el estudio de incertidumbres esté basado en medidas y no en adquisiciones ideales le da al estudio un carácter práctico a este análisis. Además, este simulador permite examinar el efecto de distintos tipos de incertidumbres en los parámetros de antena. Por otra parte cabe resaltar que este simulador está integrado en un software de medidas en cámara anecoicas que permite llevar a cabo la adquisición, el procesado y la representación de resultados de forma automatizada gracias a un entorno amigable y de fácil manejo.

## REFERENCIAS

- [1] A. Balanis, "*Antenna Theory (Analysis and Design)*", John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 1982.
- [2] A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Olver, P. Knight (ed.), "*The Handbook of Antenna Design (VOL 1)*", published by Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1982.
- [3] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, "*IEEE Standard Test Procedures for Antennas*", 1979 and approved by the American National Standards Institute, 1980.
- [4] J. E. Hansen (ed.), "*Spherical Near-Field Antenna Measurements*", Peter Peregrinus Ltd., on behalf of IEE, London, UK, 1988.
- [5] B. N. Taylor and C. E. Kuyatt, "*Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*", National Institute of Standards and Technology (NIST) Technical Note 1297, 1994 Edition, United States Department of Commerce Technology Administration.
- [6] Centro Español de Metrología (CEM – Spanish Metrology Centre) E. Prieto-Esteban -, "*Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida (Guide book for the Measurement Uncertainty Expression)*", Centro Español de Metrología (Spanish Metrology Centre – CEM); Segunda Edición (Second Edition), 2000; Tres Cantos, Madrid, Spain.
- [7] D. G. Gentle, A. Beardmore, J. Achkar, J. Park, K. MacReynolds, J. P. M. De Vreede, "*National Physical Laboratory (NPL) Report CETM 46: Measurement Techniques and Results of an Intercomparison of Horn Antenna Gain in IEC-R 320 at Frequencies of 26.5, 33.0 and 40.0 GHz*", September 2003.